



The role of microwave curing in the production of natural pozzolan-based geopolymer

Kübra Ekiz Barış*

Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, Kocaeli University, 41300, Kocaeli, Türkiye

Highlights:

- Natural pozzolan-based geopolymer material is suitable for production by microwave curing
- Geopolymerization reaction degree and material properties vary according to the applied curing methods
- “Combined curing method” in which heat and microwave curing are applied together, develops optimum material properties

Keywords:

- Geopolymer,
- Combined curing method,
- Heat curing,
- Microwave curing,
- Material property

Article Info:

Research Article
Received: 17.03.2023
Accepted: 30.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1267017

Correspondence:

Author: Kübra Ekiz Barış
e-mail: kubra.ekizbaris@kocaeli.edu.tr
phone: +90 538 827 7727

Graphical/Tabular Abstract

This research was carried out with an experimental method in order to produce natural pozzolan-based geopolymer mortar with different curing methods. The experimental process of the production conditions of the specimens is presented in Figure A.

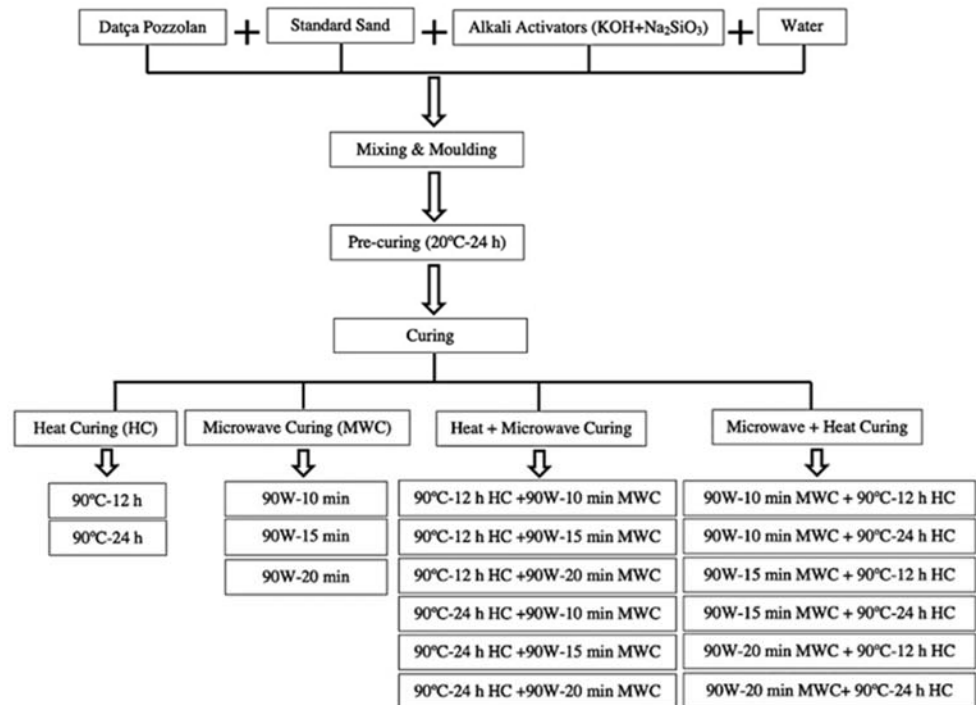


Figure A. Production stages of natural pozzolan-based geopolymer mortar specimens

Purpose: The purpose of this research is to evaluate the possibilities of improving the properties of natural pozzolan-based geopolymer with microwave curing in a shorter time and with less energy consumption.

Theory and Methods: Volcanic tuff from the Datça Peninsula in Turkey was used as the source of aluminosilicate, standard sand was used as a filler, and 10 molar potassium hydroxide and sodium silicate were used as alkali activators. The specimens were cured by four different methods: (i) conventional heat curing only; (ii) microwave curing only; (iii) heat+microwave curing; (iv) microwave+heat curing.

Results: It is possible to increase the physical and mechanical properties of natural pozzolan-based geopolymer mortar with microwave curing in a shorter time and with less energy consumption compared to conventional heat curing. Heat+microwave or microwave+heat curing (combined curing methods) provided higher physical and mechanical properties than only heat or microwave curing.

Conclusion: The highest degree of reaction and the highest physical and mechanical properties were obtained with 24 hours of heat + 15 minutes of microwave curing. Although the application of this combined curing method causes a little more energy consumption compared to other methods, it is important in terms of improving the properties of the natural pozzolan-based geopolymer material.



Doğal puzolan-esaslı jeopolimer üretiminde mikrodalga kürünün rolü

Kübra Ekiz Barış*

Kocaeli Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 41300, İzmit, Kocaeli, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Doğal puzolan esaslı jeopolimer malzeme mikrodalga kürüyle üretime elverişlidir
- Jeopolimerleşme reaksiyon derecesi ve malzeme özellikleri uygulanan kür yöntemlerine göre değişmektedir
- Isı ve mikrodalga kürünün birlikte uygulandığı “kombine kür yöntemi” ideal malzeme özellikleri geliştirmektedir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.03.2023

Kabul: 30.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1267017

Anahtar Kelimeler:

Jeopolimer,
kombine kür yöntemi,
mikrodalga kürü,
ısı kürü,
malzeme özelliği

ÖZ

Bu araştırmanın amacı, doğal puzolan esaslı jeopolimer malzeme özelliklerinin mikrodalga kürüyle daha kısa sürede ve daha az enerji harcanarak geliştirilebilmesi olanaklarını değerlendirmektir. Alüminosilikat kaynağı olarak volkanik tüf, dolgu maddesi olarak standart kum ve alkali aktivatör olarak potasyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Üretilen numuneler dört farklı yöntemle kürlenerek sertleştirilmiştir: (i) Geleneksel ısı kürü; (ii) Mikrodalga kürü; (iii) Isı + mikrodalga kürü; (iv) Mikrodalga + ısı kürü. Araştırma sonucunda, doğal puzolan esaslı jeopolimer özelliklerinin mikrodalga kürüyle geleneksel ısı kürüne nazaran daha kısa sürede ve daha az enerji harcanarak geliştirilebilmesinin mümkün olduğu belirlenmiştir. Isı + mikrodalga ve mikrodalga + ısı kürü (kombine kür yöntemleri), yalnızca ısı veya yalnızca mikrodalga kürüne nazaran daha yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere ulaşılmasını sağlamıştır. En düşük porozite (% 13,03), en yüksek reaksiyon derecesi (% 18,67), birim hacim ağırlık (2,3 g/cm³), ultrases geçiş hızı (3,1 km/s), eğilmede çekme dayanımı (4,22 MPa) ve basınç dayanımı (15,05 MPa) 90°C’de 24 saat ısı kürü ve ardından uygulanan 15 dakika mikrodalga kürüyle elde edilmiştir. Kombine kür yöntemlerinin uygulanması, diğer yöntemlere nazaran nispeten daha yüksek enerji tüketimine yol açmasına rağmen, malzemenin mekanik özelliklerini yaklaşık iki kat geliştirmesi bakımından önemlidir.

The role of microwave curing in the production of natural pozzolan-based geopolymer

HIGHLIGHTS

- Natural pozzolan-based geopolymer material is suitable for production by microwave curing
- Geopolymerization reaction degree and material properties vary according to the applied curing methods
- “Combined curing method” in which heat and microwave curing are applied together, develops optimum material properties

Article Info

Research Article

Received: 17.03.2023

Accepted: 30.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1267017

Keywords:

Geopolymer,
combined curing method,
heat curing,
microwave curing,
material property

ABSTRACT

The aim of this research is to evaluate the possibilities of improving the properties of natural pozzolan-based geopolymers with microwave curing in a shorter time and with less energy consumption. Volcanic tuff was used as an aluminosilicate source, sand was used as a filler, and potassium hydroxide and sodium silicate were used as alkali activators. The specimens were cured by four various methods: (i) heat; (ii) microwave; (iii) heat+microwave; (iv) microwave+heat curing. It has been determined that it is possible to improve the properties of mortar with microwave curing in a shorter time and with less energy consumption compared to heat curing. Heat+microwave and microwave+heat curing provided higher properties than only heat or only microwave curing. The lowest porosity (13,03 %) and the highest degree of reaction (18,67 %), unit weight (2,3 g/cm³), ultrasound pulse velocity (3,1 km/s), flexural strength (4,22 MPa), and compressive strength (15,05 MPa) were obtained by 24 hours of heat curing at 90°C followed by 15 minutes of microwave curing. The application of the combined curing methods is important in terms of improving the mechanical properties of the material approximately two times, although it causes a little more energy consumption compared to other methods.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *kubra.ekizbaris@kocaeli.edu.tr / Tel: +90 538 827 7727

1. Giriş (Introduction)

Dünya genelinde kaynak ve enerji etkinliği yüksek ve CO₂ ayak izi düşük yapı malzemeleri geliştirme çabası hızlanarak sürmektedir. Jeopolimer malzemeler, içeriğinde çimento bulunmaması, amorf silis ve alümin içeren herhangi bir hammadde kaynağından üretilebilmesi ve ortam sıcaklığı veya nispeten yüksek sıcaklıklar uygulanarak sertleştirilebilmesinden dolayı çimentonun çevre dostu alternatiflerinden biridir. Jeopolimer malzemelerin üretimi, amorf ya da camsı alüminosilikat hammaddelerin çeşitli kimyasallar (alkali aktivatör) ile reaksiyona girerek sertleşmesi prensibine dayanmaktadır [1]. Yüksek mekanik mukavemeti erken dönemde kazanan bu malzemeler, yüksek sıcaklıklara, kimyasallara ve atmosferik kirleticilere karşı yüksek dayanıklılığa sahiptir [2]. Bunlara ek olarak, jeopolimer üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu çimento üretimine nazaran % 60 ila % 80 daha azdır [3].

Jeopolimer yapının gelişmesinde ve final ürünün fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde uygulanan kür yöntemleri ve kür koşullarının (sıcaklık, süre, nem) etkisi büyük olduğundan malzeme için en uygun kürün seçilmesi gerekmektedir. Uygun olmayan kürleme, yüksek porozite ve geçirgenliğe yol açarak malzemenin mukavemetini düşürür ve malzemenin beklenen performansın sağlanmasını engeller. Özellikle kür sıcaklığı en etkili parametre olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklık etkisiyle kürleme enerji yoğun bir uygulama olmasına rağmen, alüminosilikat hammadde kaynağının jeopolimerleşme reaksiyonlarını başlatabilmesi için yüksek bir dış enerjiye ihtiyacı vardır [4]. Ortam sıcaklığının altında (7°C-20°C) veya ortam sıcaklığında kürleme, jeopolimerleşme reaksiyon hızının yavaş olması ve bağlayıcının sertleşmesinin gecikmesinden dolayı jeopolimer malzemelerin üretimi için uygun değildir [5-9]. Nath ve Sarker [6] ve Hardjito vd. [8], düşük kalsiyum içeren uçucu kül esaslı jeopolimer betonun, Wang vd. [7], çimento fırını tozu ve uçucu kül karışımından oluşan jeopolimer bağlayıcıların, Heah vd. [9], kaolin esaslı jeopolimer bağlayıcıların ortam sıcaklığında kürlendiğinde reaksiyon hızının yavaş ve mukavemet gelişiminin düşük düzeyde kaldığını belirtmiştir. Muñiz-Villarreal vd. [10], metakaolin esaslı jeopolimer özellikleri üzerinde farklı kür sıcaklıklarının etkisini araştırdığı çalışmada, 50°C'den daha düşük kür sıcaklıklarında, alüminosilikat kaynağının çözünmesi ve hidroksil bileşenlerinin oluşumunun tamamlanmadığını ve böylece üretilen malzemenin mekanik mukavemetinin düşük olduğunu tespit etmiştir. Yükseltilmiş sıcaklıkta kürleme, alüminosilikat kaynağında bulunan reaktif bileşenlerin daha iyi çözünmesini sağlamak ve reaksiyon gelişimini engelleyen etkenlerin üstesinden gelmektedir [5]. Kür sıcaklığındaki 90°C'ye kadar artış, reaktif bileşenlerin çözünmesini kolaylaştırmakta [9], amorf yapıdaki çapraz bağlanmayı önemli ölçüde geliştirmekte [11] ve sonuç ürünün mekanik dayanımını artırmaktadır [7, 12]. Yurt [13], yüksek fırın cürufu esaslı jeopolimeri 25°C, 60°C ve 90°C'de kürlendiği çalışmada kür sıcaklığındaki artışın malzemenin mekanik özelliklerini artırdığını belirtmiş ve özellikle yüksek sıcaklıklı iklim koşullarına sahip ülkelerde bu malzemelerin kullanımının avantajlı olduğunu vurgulamıştır. Bir diğer çalışmada Noushini ve Castel [14], uçucu kül esaslı jeopolimer bağlayıcıyı 25°C, 75°C ve 90°C'de 24 saat kürlenmiş ve ortam koşullarında kürlenen numunelere nazaran sıcaklık etkisiyle kürlenen numunelerin porozite ve kılcal geçirimsizlik katsayısının daha düşük olduğunu tespit etmiştir.

Jeopolimer malzemelerin daha yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldığı araştırmalar da literatürde mevcuttur. Öztürk ve Atabey [15], yüksek sıcaklıklara (400°C ve 800°C) maruz bırakılan atık seramik (sıhhi tesisat) tozu ile ürettikleri jeopolimer harçların ve Çelikten vd. [16], yüksek sıcaklıklara (400°C, 600°C ve 800°C) maruz bırakılan kalsine edilmiş perlit ve cürufu esaslı jeopolimer harçların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmalarda, malzemeyi

800°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakmanın heterojen bir içyapı oluşumuna neden olduğu, mikro çatlakların gelişerek porozitenin arttığı ve mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir. Çelikten ve Erdoğan [17], yüksek sıcaklıklara (400, 600 ve 800°C) maruz bırakılan ham perlit ve uçucu kül esaslı jeopolimerin basınç dayanımının 600°C'ye kadar azaldığını, ancak 800°C'de tekrar arttığını belirlemiştir. 800°C'de tespit edilen dayanım gelişimi, bu sıcaklıkta harç yapısında yeni kristal fazların oluşumuna ve böylece harç porozitesinin azalmasına dayandırılmıştır.

Kür süresi malzemenin fiziksel, mekanik ve içyapı özelliklerini etkileyen bir diğer önemli kür koşuludur. Ortam sıcaklığında kür süresinin 90, 180 ve hatta 365 güne kadar artırılması jeopolimer malzemelerin özelliklerini geliştirmektedir. Tuyan vd. [18], atık kil tuğlası tozundan ürettiği jeopolimeri ortam koşullarında 3 gün kürlendiğinde yeterli sertleşme gerçekleşmediğinden dolayı deneyleri uygulayamamıştır. Ancak, kür süresinin 28 ve 90 güne uzatılmasıyla malzemenin basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. González-García vd. [19], doğal puzolan esaslı jeopolimerin erken dönemden itibaren faz oluşumlarını ve içyapı gelişimini araştırdığı çalışmada, ilk 3 gün içerisinde, alüminosilikat kaynağının çözünmesiyle ilgili olan mineral fazları içyapıda tespit etmiştir. 7 ve 14. günlerde, çözünmüş fazlar hala reaksiyon ortamında mevcuttur ve jeopolimer matrisin oluşumu devam etmektedir. 28. günde, polikondansasyon reaksiyonlarının oluşumuna yönelik, yoğunlaşmış zincir yapılarıyla birbirine bağlanmış bir matris mevcuttur. Tespit edilen içyapı gelişimi malzemenin dayanımındaki artışla paraleldir. Diğer yandan, Rovnaník [20], daha yüksek kür sıcaklığında (40°C), kür süresini 1 saatten 4 saate artırdığında metakaolin esaslı jeopolimerin basınç dayanımında yaklaşık üç kat artış tespit etmiştir. Bir diğer çalışmada ise Ma vd. [21], uçucu kül esaslı jeopolimerin boşluk yapısı ve su geçirimsizliği üzerinde (40°C'de) kür süresinin etkinliğini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, kür süresinin 7 günden 28 güne artmasıyla jeopolimerin su geçirimsizliğinin önemli derecede azaldığı tespit edilmiştir. Daha yüksek kür sıcaklıklarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, Görhan ve Kürklü [22], 65°C ve 85°C'de kürlenen uçucu kül esaslı jeopolimer harçlarda kür süresinin 2 saatten sırasıyla 5 ve 24 saate artırılmasına bağlı olarak porozitenin azaldığını ve mekanik özelliklerin arttığını belirtmiştir. Çelikten ve Atabey [23], 90°C'deki kür süresinin atık bazalt tozu esaslı jeopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada, kür sıcaklığının 4 saatten sırasıyla 8 ve 24 saate artırılması sonucunda harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştiği tespit edilmiştir. Bir diğer çalışmada Mahmut ve Emiroğlu [24], öğütülmüş ferrokrom cürufu esaslı jeopolimeri 40°C, 65°C ve 90°C'de 1, 2 ve 4 gün kürlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 90°C'de 2 gün kürlenen numunelerde tespit edilmiştir. Aynı sıcaklıkta kür süresinin 4 güne artırılmasıyla numunelerin basınç dayanımı azalmıştır. Bu sonuca benzer olarak Li vd. [25] ve Zuhua vd. [26], metakaolin esaslı jeopolimerleri 90°C gibi daha yüksek sıcaklıklarda daha uzun süre (7 gün) kürlendiğinde, kuruma rötresi nedeniyle matriste mikro kusurlar oluştuğunu ve malzemenin mekanik mukavemetinin olumsuz yönde etkilendiğini belirlemiştir.

Jeopolimer üretiminde uygulanan geleneksel kür yöntemlerinin (ortam koşulunda, su içerisinde ve etüvde ısı etkisiyle) çoğunda, fiziksel ve mekanik özelliklerin yeterince gelişimini sağlamak için uzun bir kür süresine ihtiyaç vardır. Diğer yandan, özelliklerin daha kısa sürede geliştirilmesi amacıyla farklı kür yöntemleri de uygulanabilmektedir. Mikrodalga kürü, jeopolimer malzemelerin kısa sürede istenen performans kriterlerine sahip olmasını sağlayabilen nispeten yenilikçi bir kür yöntemidir. Mikrodalga, 300 MHz ile 300 GHz arasında değişen frekanslara sahip elektromanyetik radyasyondur ve enerjinin polar moleküller ve iyonik iletimle soğurulmasıyla dielektrik ısıtma sağlar. Geleneksel ısıtma ile

karşılaştırıldığında, mikrodalga kürü kısa reaksiyon süresi içerisinde gelişmiş bir reaksiyon kinetiği sağlamak, malzemenin her yönden eşit ısınmasını sağlamak, düşük ısı kaybına yol açmakta ve böylece daha yüksek enerji verimliliğini beraberinde getirmektedir [27]. Geleneksel ısı kürü altında, ısı enerjisi, taşınım, iletim ve ısı radyasyonu yoluyla malzemenin yüzeyinden çekirdeğine aktarılır [28]. Bu nedenle, numunedeki ısınma her yönden eşit değildir ve gerekli sıcaklığa ulaşmak için uzun bir kür süresi gerekmektedir. Geleneksel ısıtmada, homojen bir ısıtma sağlanmadığından numunenin yüzeyi ve köşeleri çekirdeğe nazaran çok daha fazla ısınır ve malzeme kalitesi değişebilir [29]. Ayrıca, geleneksel ısıtma yöntemlerinde ısı iletimi ve taşınım yoluyla enerji kaybı oluşmaktadır [27]. Ancak mikrodalga küründe, enerji, elektromanyetik alanla moleküler etkileşim yoluyla doğrudan malzemeye gönderilir, elektromanyetik enerji termal enerjiye dönüştürülür ve malzeme hacimsel olarak homojen bir şekilde ısınır [28].

Mikrodalga kürüyle jeopolimer bağlayıcı üretiminde reaksiyon aşamaları diğer kür yöntemleriyle gerçekleşen reaksiyon aşamalarına benzerdir. İlk reaksiyon aşaması olan çözünmede, alüminosilikat kaynağı alkali aktivatör yardımıyla çözünerek alüminat ve silikat monomerleri oluşmaktadır. Bu aşamada, polar su molekülleri mikrodalgayı absorbe eder ve hızla değişen bir elektriksel alanda dipolar yönelimlerini düzenler. Bu durum jeopolimer malzemenin içten ısınmasını sağlayarak çözünmeyi hızlandırır. Sonrasında, Al^{3+} ve Si^{4+} iyonları oligomerlere dönüştürülür ve oligomerlerin birbirine çapraz bağlarla bağlanmasıyla (polikondansasyon) üç boyutlu amorf bir alüminosilikat jel yapısı üretilir. Mikrodalga işlemi, bu alüminosilikat jel yapısının sürekli olarak yeniden düzenlenmesini gerçekleştirerek daha iyi malzeme özelliklerinin kazanılmasını destekler [27].

Mikrodalga kürünün jeopolimerleşme reaksiyonlarının gelişimini olumlu yönde etkilediğini tespit eden araştırmalar literatürde mevcuttur. Somaratna vd. [30], uçucu kül esaslı jeopolimer harçların mikrodalga kürü etkisi altındaki davranışını inceledikleri araştırmada, geleneksel ısı kürüyle $75^{\circ}C$ 'de 48 saatte elde edilen dayanımdan daha yüksek bir değer olan 240 W mikrodalgada 120 dakikadan daha kısa sürede sağlanabildiği tespit edilmiştir. Chindaprasit vd. [31], yine uçucu kül esaslı jeopolimeri 90 W mikrodalgada 5 dakika kürledikten sonra $65^{\circ}C$ 'de 6 saat etüv kürüne tabi tutmuştur. Elde edilen mukavemetin $65^{\circ}C$ 'de 24 saat etüv küründe elde edilen değerlere yakın olması mikrodalga kürünün üretim sürecinde zaman tasarrufu sağladığını gözler önüne sermektedir. Graytee vd. [28], uçucu kül esaslı jeopolimeri mikrodalga kürüyle kısa sürede sertleştirmeye çalıştıkları araştırmada, etüvde $120^{\circ}C$ 'de 30 dakikada elde edilen basınç dayanımını (44 MPa), 200 W mikrodalgada 10 dakikada elde etmiştir. Mikrodalgada 30, 45 ve 60 dakika kürleme etüvde $90^{\circ}C$ ve $120^{\circ}C$ 'de aynı sürelerde kürlemeye nazaran 1,32-3,04 kat daha yüksek basınç dayanımı sağlamıştır. Bir diğer araştırmada Hong ve Kim [32], kömür tabanı külü esaslı jeopolimeri $75^{\circ}C$ 'de 12, 24 ve 36 saat ön kürlemeye tabi tuttukten sonra 700 W mikrodalgada 0-7 dakika kürlemiştir. Etüvde 36 saat kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı 12,8 MPa iken, 3 dakika mikrodalga kürü uygulandıktan sonra önemli miktarda artış (40,5 MPa) göstermiştir. El-Feky vd. [29], cüf esaslı jeopolimerin özellikleri üzerinde geleneksel kür yöntemlerine ($80^{\circ}C$ 'de 4 saat) nazaran mikrodalga kürünün ($720 W$ 'ta, 2, 4 ve 6 dakika) etkinliğini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, mikrodalga kürünün kısa süre içerisinde yüksek dayanım sağladığı ve

matrisin mikro yapısını geliştirdiği tespit edilmiştir. Bai vd. [33], karbonize yüksek fırın cürufu esaslı jeopolimerin mekanik özelliklerini farklı kür koşulları altında geliştirme olanaklarını araştırmıştır. Çalışma sonucunda, $60^{\circ}C$ 'de 6 saat uygulanan etüv kürünün ardından $210 W$ 'ta 15 dakika uygulanan mikrodalga kürü en yüksek basınç dayanımı (76,3 MPa) sağlayan ideal kür koşulu olarak tespit edilmiştir.

Mikrodalga kürünün jeopolimerleşme reaksiyonlarının gelişimini olumlu yönde etkilediğini tespit eden araştırmalarda, alüminosilikat hammadde kaynağı olarak uçucu kül, kömür tabanı külü, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi yapay puzolanlar kullanılmıştır. Ancak, yapay puzolanların aksine, doğal puzolan esaslı jeopolimerin yenilikçi bir kür yöntemi olan mikrodalga kürüyle geliştirilmesine yönelik çalışmalar kısıtlıdır. Gültekin ve Ramyar 2023 yılında gerçekleştirdikleri araştırmalarında [35], doğal puzolan kaynağı olarak perlit ve pomza, yapay puzolan kaynağı olarak ise uçucu kül ve pişmiş kil esaslı jeopolimerin mikrodalga kürüyle üretilmesi olanaklarını değerlendirmiştir. Ancak, çalışmada yalnızca ısı kürü (60 ve $120^{\circ}C$ 'de 1 ve 3 gün) ve yalnızca mikrodalga kürü (450 ve $600 W$ 'ta 15 dakika) uygulamalarının özellikleri ne yönde etkilediği karşılaştırılmıştır. Söz konusu kür yöntemlerinin doğal puzolan esaslı jeopolimer üzerinde bir arada uygulandığı deneysel bir araştırma yapılmamıştır. Ayrıca, her bir kür yöntemindeki toplam sertleşme süresi ve tüketilen toplam enerji miktarı gibi üretim pratikliği ve ekonomikliği açısından önemli diğer parametreler göz önünde bulundurulmamıştır. Bundan dolayı, bu araştırmanın amacı, doğal puzolan esaslı jeopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin ısı ve mikrodalga kürünün birlikte uygulandığı "kombine kür yöntemleri" ile geliştirilmesi olanaklarını değerlendirmek, sıcaklık, süre ve nem gibi önemli kür koşullarının etkinliğini belirlemek ve farklı kür yöntemlerinin uygulanma sırasının değiştirilmesi sonucunda malzeme özelliklerinin ne yönde değişeceğini tespit etmektir. Kombine kür yöntemlerinin diğer kür yöntemlerine nazaran etkinliğinin belirlenebilmesi için yalnızca ısı kürü ve yalnızca mikrodalga kürü de çalışma kapsamına alınmış ve gerek fiziksel/mechanik özellikler gerekse üretim süreci ve üretimde tüketilen enerji miktarı saptanarak ideal kür yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Malzeme ve Metot (Materials and Methods)

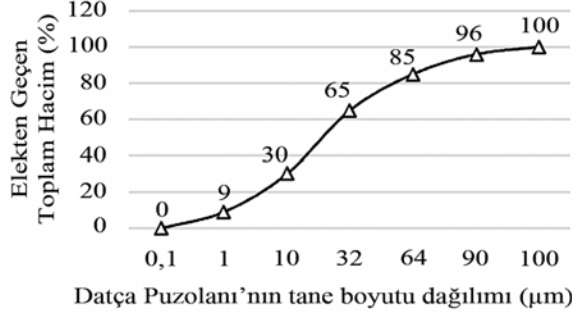
2.1. Hammaddeler (Raw Materials)

Türkiye'nin Datça Yarımadası'nda bulunan ve beyazımsı gri renkte bir toprak olan Datça Puzolanı, % 95'ten fazla inorganik maddelerden oluşan, az miktarda organik madde, su ve hava bulunduran volkanik bir tüftür. Araştırmacılara göre bu tüf, Nysiros ve Yelli Adaları'ndaki volkanik merkezlerin güçlü volkanik patlamaları vasıtasıyla oluşmuştur [36]. Philips 71 PW-2404 model XRF cihazıyla analiz edilen puzolanın kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre, puzolanın kimyasal bileşiminin % 90'ından daha fazlasını jeopolimerleşme reaksiyonlarının gerçekleşebilmesi için gereken temel oksitler olan SiO_2 ve Al_2O_3 oluşturmaktadır. Malzeme düşük CaO oranına (%1,22) sahiptir. Alkali çözelti ile reaksiyon gelişimini hızlandırmak amacıyla bilyalı değirmende öğütülen puzolanın en büyük tane boyutu 100 mikrometredir ve tane boyutu dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. Blaine yöntemiyle [37] belirlenen özgül yüzey alanı $5467 cm^2/g$ ve ASTM D854-10 [38]'e göre belirlenen özgül ağırlığı $2,52 g/cm^3$ 'tür.

Tablo 1. Datça Puzolanı'nın kimyasal bileşimi (Chemical composition of Datça Pozzolan)

Bileşen	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	P_2O_5	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO_2	Cr_2O_3	NiO
% (Ağırlıkça)	75,29	15,99	0,98	1,22	0,62	0,07	3,02	2,21	0,14	0,04	0,005	0,004
Bileşen	CuO	ZnO	Rb	SrO	Y_2O_3	ZrO ₂	Nb_2O_5	BaO	Cl	SO ₃	KK	Toplam
% (Ağırlıkça)	0,002	0,002	0,006	0,015	0,002	0,01	0,001	0,097	0,092	0,1	0,084	100

Alüminosilikat kaynağını (Datça Puzolanı) aktive etmek için % 99 saflıkta 10 molar (M) potasyum hidroksit (KOH) ve ticari sodyum silikat (SS, Na₂SiO₃) kimyasalları kullanılmıştır. Sıvı sodyum silikat % 7,5 Na₂O, % 25,5 SiO₂ ve % 67,0 H₂O içermektedir. Alkali çözeltiler jeopolimer karışımında kullanılmadan 24 saat önce hazırlanarak kapalı bir cam kap içerisinde oda sıcaklığına ulaşmaya kadar soğutulmuştur. Jeopolimer harç üretimi için bağlayıcı içerisine TS EN 196-1 [39]'e uygun ve en büyük tane boyutu 2 mm olan standart CEN kumu eklenmiştir.



Şekil 1. Öğütülmüş Datça Puzolanı'nın tane boyutu dağılımı (Particle size distribution of grounded Datça Pozzolan)

2.2. Karışım Oranları ve Numune Hazırlama (Mixing Ratios and Specimen Preparation)

Jeopolimer malzemenin özellikleri üzerinde kullanılan hammaddelerin karışım oranları önemli bir etkiye sahiptir. Araştırmada kullanılan SS/KOH (aktivatör oranı) ağırlıkça 2,5, toplam aktivatör/puzolan oranı ağırlıkça 0,3 ve puzolan/standart kum oranı ağırlıkça 1/3'tür. Karışımların işlenebilirliği ASTM C1437-20 [40]'e göre uygulanan sarsma tablası deneyiyle belirlenmiştir. İdeal işlenebilirlik (% 100) sağlandığı durumda su/bağlayıcı oranı 0,27 olarak sabit tutulmuştur. 40x40x160 mm boyutlarında üç adet numune (1 kalıp) üretmek için kullanılan hammadde miktarları Tablo 2'de verilmektedir.

Jeopolimer harç karışımı hazırlanırken ilk olarak Datça Puzolanı ve standart kum kuru halde elektrikli bir harç karıştırıcısı yardımıyla 50 rpm hızla 5 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışıma, alkali aktivatörler ve su kademeli olarak eklenmiş ve aynı hızla homojen bir harç üretilinceye kadar 5 dakika daha karıştırılmıştır. Taze haldeki harç 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Taze haldeki harcin suyunun buharlaşma ile hızlı bir şekilde kaybolmaması için kalıplar polietilen (PE) kaplanarak farklı kür koşullarında sertleştirilmek üzere hazır hale getirilmiştir.

2.3. Kür Koşulları (Curing Conditions)

Bütün numuneler kalıplandıktan sonra PE kaplı halde ilk 12 saat boyunca ortam koşullarında (20±2 °C ve % 95±5 bağıl nem) ön kürlenmeye tabi tutulmuştur. Ön kürlenmenin ardından kalıptan çıkabilecek hale gelen numuneler farklı kür yöntemlerine tabi tutulmuştur:

- Yalnızca geleneksel ısı kürü: Numuneler PE içerisinde 90°C'de havalandırılmalı bir etüvde 12 ve 24 saat kürlenmiştir.
- Yalnızca mikrodalga kürü: Numuneler PE kaplanmaksızın 2,45 GHz frekansta ve 0-700 W arasında ayarlanabilir güce sahip mikrodalga fırına yerleştirilmiştir. Güç seviyesi, ön deney sonuçlarına göre, 90 W olarak ayarlanmıştır. Ön deneylerde 90 W'tan daha yüksek bir mikrodalga gücünün, numunenin 5 dakika içinde çatlamasına neden olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, optimum mikrodalga gücü 90 W olarak belirlenmiştir. Bu güç altında numuneler 10, 15 ve 20 dakika kürlenmiştir.
- Isı + mikrodalga kürü: 90°C'de 12 ve 24 saat ısı kürünün ardından, 90 W mikrodalgada 10, 15 ve 20 dakika uygulanan kombine kür yöntemidir.
- Mikrodalga + ısı kürü: 90 W'ta 10, 15 ve 20 dakika mikrodalga kürünün ardından 90°C'de 12 ve 24 saat ısı kürünün uygulandığı kombine kür yöntemidir.

Doğal puzolan esaslı jeopolimer harcin üretim aşamaları Şekil 2'de özetlenmektedir.

Farklı kür yöntemleriyle üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki numunelere fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik deneyler uygulanmıştır. Birim hacim ağırlık deneyi TS EN 1015-10 [41]'e uygun olarak, ultrases geçiş hızı deneyi TS EN 14579 [42] uyarınca, eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri ise TS EN 196-1 [39]'e uygun olarak yapılmıştır.

Etüvde ve mikrodalgada kürlenme sırasında numune sertleşirken bünyede bulunan su buharlaşmakta ve numunelerinin ağırlığı sürekli olarak azalmaktadır. Jeopolimerlerin su içeriğinin basınç dayanımı ile yakın bir ilişkisi olduğundan, numunelerden buharlaşan su miktarının saptanması gerekmektedir. Numunelerdeki ağırlık kaybı Eş. 1 uyarınca hesaplanmıştır:

$$\text{Ağırlık kaybı (\%)} = \frac{(G_i - G_f)}{G_i} \times 100 \quad (1)$$

G_i numunenin kür işleminden önceki ağırlığı, G_f ise kürlenme sonunda oda sıcaklığına kadar desikatörde soğutulan numune ağırlığıdır.

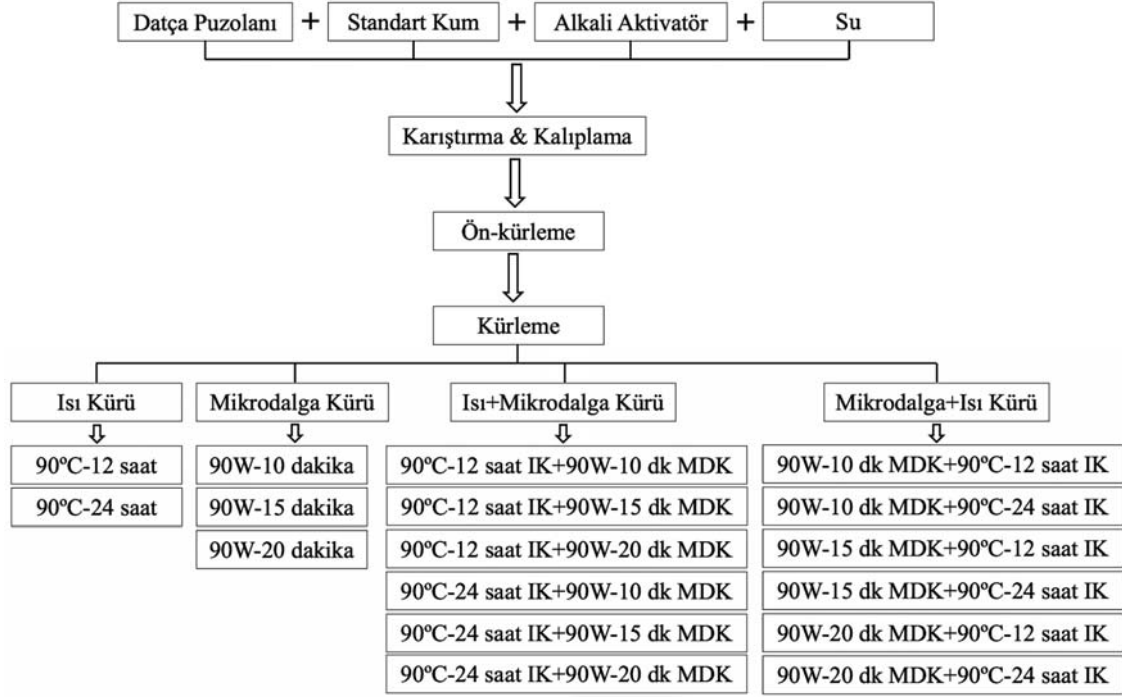
Ohsawa vd. [43], jeopolimerlerin reaksiyon derecesini belirlemek için kapsamlı yöntemler tanımlamıştır. Bununla birlikte, jeopolimer malzemeleri ortam sıcaklığında hidroklorik asit (HCl) ile çözme yöntemi birçok araştırmacı tarafından benimsenmiştir [44, 45]. Bunun için, basınç dayanım deneyi sonrasında elde edilen yaklaşık 1 gr öğütülmüş numune 1/20 HCl (hacimce) ile mekanik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Daha sonra, karışım filtre kağıdıyla süzülmuştür. Elde edilen tortu, pH değerini 7'ye getirmek için distile su ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Reaksiyon derecesi Eş. 2 kullanılarak belirlenmiştir [46]:

$$\text{Reaksiyon derecesi (\%)} = 100 - \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100 \quad (2)$$

m_i alınan numunenin ilk ağırlığı, m_f ise numunenin HCl ile çözülme ve kurutma işlemleri sonundaki ağırlığıdır. Her bir deney sonucu üçer adet numune ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Jeopolimer harç üretiminde kullanılan hammadde miktarları (Amount of raw materials used in the production of geopolymer mortar)

Hammaddeler	Datça Puzolanı (kg)	Na ₂ SiO ₃ (SS) (kg)	KOH (kg)	Standart kum (kg)	Toplam su (kg)
Ağırlıkça (%) (1 m ³ için)	4687	1004	401	14062	1265
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,52	1,30	1,05	2,65	1,0



Şekil 2. Doğal puzolan esaslı jeopolimer harç numunelerinin üretim aşamaları
(Production stages of natural pozzolan-based geopolymer mortar specimens)

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Yalnızca Isı Kürü ve Mikrodalga Kürünün Jeopolimer Malzemenin Özellikleri Üzerindeki Etkileri (The Effects of Only Heat and Microwave Curing on the Properties of Geopolymer Material)

Yalnızca ısı kürü ve mikrodalga kürü uygulanan jeopolimer malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin gelişimi üzerinde kür koşullarının etkileri Şekil 3'te verilmektedir.

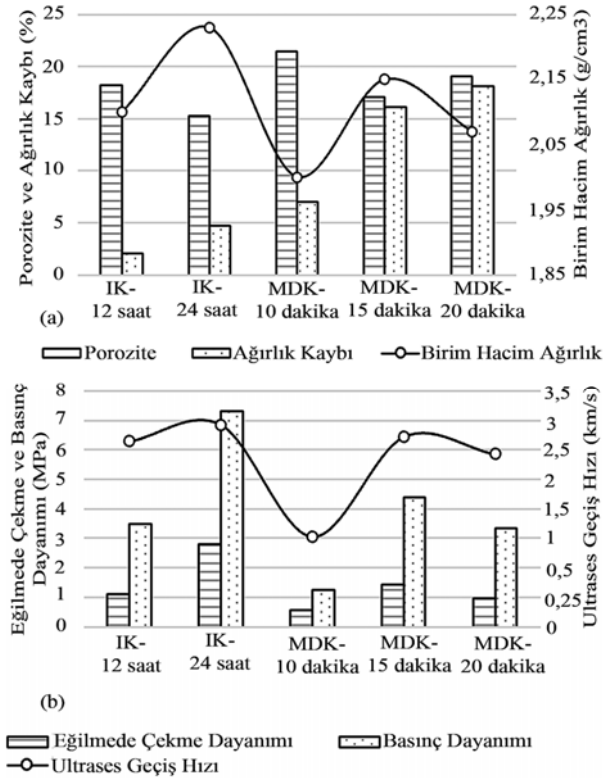
Yalnızca ısı kürüne (90°C) tabi tutulan numunelerde kür süresinin 12 saatten 24 saate artırılması porozitenin % 18,19'dan % 15,22'ye azalmasını sağlamıştır. Daha az boşluklu hale gelen bir matristen beklendiği üzere, malzemenin birim hacim ağırlığı (yoğunluğu) 2,10 g/cm³'ten 2,23 g/cm³'e artmıştır. Tahribatsız bir deney yöntemi olan ultrases geçiş hızı, hidrasyon kinetiğinin sürekli ölçümlerini almayı, karışım oranı ya da kür koşullarındaki değişikliklerin malzeme özellikleri üzerindeki etkisini belirlemeyi ve malzemenin mukavemet gelişimini değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır [47]. Gözeneklilikteki azalmanın bir sonucu olarak, daha kompakt bir mikro yapıya sahip numunelerin ultrases geçiş hızı artan kür süresiyle birlikte artmıştır. Diğer bir deyişle, malzemede sesin soğurulma veya dağılma hızını azaltacak çatlak ve boşluklar bulunmamaktadır ve malzeme bünyesi daha homojen bir yapıya doğru gelişmektedir. Bahsedilen bu fiziksel özelliklerdeki değişimler, jeopolimer matrisin strüktürel olarak geliştiğini göstermektedir. Kür süresinin 12 saatten 24 saate artırılması, malzemenin eğilmede çekme dayanımında yaklaşık 2,5 kat artışı (1,12 MPa'dan 2,8 MPa'a) ve basınç dayanımında yaklaşık 2,1 katlık artışı (3,50 MPa'dan 7,31 MPa'a) beraberinde getirmiştir. Artan kür süresiyle birlikte mekanik özelliklerde tespit edilen gelişim, literatürde zeolit içeren yüksek fırın çürüğü esaslı jeopolimer betonun 90°C'de 20 saat etüv kürünün ardından ortam koşullarında, oda sıcaklığındaki su içerisinde ve 60°C'de sıcak su içerisinde 3, 7 ve 28 gün kürlenmesi sonucunda da tespit edilmiştir [57]. Ayrıca, aynı dayanım gelişimi, uçucu kül esaslı jeopolimer harçların ortam koşullarında kür süresinin artmasıyla da

paralellik göstermektedir [58]. Artan kür süresiyle birlikte mekanik özelliklerde tespit edilen gelişim, malzeme bünyesinde daha fazla miktarda üç-boyutlu amorf alüminosilikat yapı (NASH jeli) oluşmasına bağlıdır ve oluşan bu jel matris içerisindeki gözenekleri doldurmada ve hidrate olmuş fazlar ve reaksiyona girmemiş puzolan parçacıkları arasındaki boşlukları kapatmaya yardımcı olmaktadır. Jeopolimerleşme aşamaları ilerledikçe, daha fazla miktarda jel, matristeki boşluk ve çatlakları daha fazla doldurarak malzeme özelliklerinin gelişimine katkı sağlamaktadır.

Malzemenin ısı kürünün tamamlanmasının ardından ağırlık kaybı oranı hesaplanmış ve ağırlık kaybının, yani malzeme bünyesinden buharlaşan toplam su oranının, önemli derecede olmadığı (12 ve 24 saatte sırasıyla % 2,1 ve % 4,8) tespit edilmiştir. Bu durum, etüvde kürlenmiş numunelerin, jeopolimerleşme için gereken suyun hızla yapıdan uzaklaşmaması için polietilen kaplı halde kürlenmesinden kaynaklanmaktadır. Polietilen içerisindeki ortam buhar bakımından doygun olduğundan, numunelerin karışım suyunun daha fazla buharlaşması engellenmiştir.

Yalnızca mikrodalga kürüne (90 W) tabi tutulan numunelerde kür süresinin 10 dakikadan 15 dakikaya artırılması porozitenin % 21,44'ten % 17,06'ya azalmasını sağlamıştır. Porozitedeki azalma, daha dolu bir bünyeye kavuşan malzemenin ultrases geçiş hızında meydana gelen 2,1 katlık artışla örtüşmektedir. Yani, mikrodalgada kür süresinin artması, matris yapısında daha fazla jeopolimer reaksiyon ürünleri oluşumunu sağlayarak fiziksel yapının gelişmesine yardımcı olmuştur. Fiziksel özelliklerde tespit edilen gelişim, malzemenin eğilmede çekme ve basınç dayanımlarının da sırasıyla 2,5 ve 3,5 kat artmasını (eğilmede 0,56 MPa'dan 1,41 MPa'a ve basınçta 1,25 MPa'dan 4,37 MPa'a) sağlamıştır. Diğer yandan, mikrodalgada 10 dakikalık kürleme sonrasında numunelerdeki ağırlık kaybı % 7,05 olup ısı etkisinde polietilen kaplı halde kürlenmişlere nazaran daha yüksektir. Kür süresinin 15 dakikaya artırılması, ağırlık kaybının 5 dakikalık kür süresine nazaran 2 kattan daha fazla artmasına (% 16,11) yol açmıştır. Yani, mikrodalga enerjisine maruz bırakıldıklarında jeopolimer numunelerdeki su hızla

buharlaşmaktadır. Su molekülleri, jeopolimerlerin özellikleri üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Çünkü su, (1) alüminosilikat kaynağına saldırarak ve onu çözmek için gerekli olan OH^- anyonunu içeren alkali aktivatörlerin (burada KOH) çözücüsü sudur, (2) reaksiyon sırasında silikat ve alüminat türlerinin çözünmesinde ve hidrolizinde bir reaktandır ve (3) polikondansasyon aşamasında yeniden üretilen bir reaksiyon ürünüdür [26]. Jeopolimerizasyon reaksiyonunun tamamında su, mikrodalgaları emen polar moleküldür. Mikrodalga ısıtılma işlemi sırasında, su moleküllerinin titreşimi jeopolimerizasyon sürecini hızlandırabilir. Depolimerizasyon olarak adlandırılan ilk aşamada, reaksiyon ortamı olarak görev yapan su molekülleri, sadece alüminosilikatların çözünmesini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ve $[\text{AlO}_4]^{5-}$ monomerleri de suyun taşıma ortamında silikon-alüminyum oligomerleri oluşturmak için serbestçe hareket edebilir. Polikondansasyon olarak adlandırılan ikinci aşamada, suyun bir reaksiyon ürünü olarak jeopolimerin gözeneklerinde tutulduğu dehidrasyon gerçekleşmektedir [27]. Ayrıca, su molekülleri, jeopolimerizasyon sürecinde reaktif iyonların taşınması için gereken ortamı sağlamaktadır. Sonuç olarak, 10 dakika kür süresinde, matristeki nem içeriği buharlaştığından, mikrodalga kürünü daha uzun süre devam ettirmenin özellikleri olumsuz etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. 10 dakika mikrodalga küründe elde edilen en düşük porozite (% 17,06), en yüksek birim hacim ağırlık (2,15 g/cm^3), en yüksek eğilmede çekme (1,41 MPa) ve basınç dayanımı (4,37 MPa) değerleri tespit edilen bu sonucu teyit etmektedir.



Şekil 3. Jeopolimer malzemenin özelliklerinin gelişimi üzerinde ısı kürü ve mikrodalga kürü koşullarının etkileri: (a) fiziksel özellikler; (b) mekanik özellikler
(Effects of heat curing and microwave curing conditions on the development of properties of geopolymer material: (a) physical properties; (b) mechanical properties)

Mikrodalga kür süresinin 20 dakikaya arttırılması, malzeme porozitesinin artmasına ve daha boşluklu hale gelen yapıdan

beklenildiği üzere, birim hacim ağırlığının, ultrases geçiş hızının, eğilmede çekme ve basınç dayanımlarının azalmasına yol açmıştır. Yani, mikrodalgada kritik bir kür süresi mevcuttur ve bu sürenin ötesinde, Şekil 3'te gösterildiği gibi, özellikler olumsuz yönde etkilenmektedir. Mikrodalganın yoğun ve doğrudan malzeme çekirdeğine nüfuz edici ısıtma özellikleri nedeniyle, jeopolimer numunelerin sıcaklığı birkaç dakikalık mikrodalga ısıtması ile 200°C 'nin çok üzerine çıkabilir [48, 49]. Isıtma sırasında, nispeten düşük bir sıcaklık aralığında (ortam sıcaklığı ile 100°C) fiziksel olarak bağlı su kolayca bünyeden uzaklaşmaktadır. Ancak, sıcaklık 100°C 'nin çok üzerine çıktığında kimyasal olarak bağlı su da numune bünyesinden ayrılmaktadır [50]. Ağırlık kaybı oranı belirli bir seviyeyi aştıktan sonra (bu çalışmada yaklaşık % 16), numunelerde, iç yapı üzerinde yüksek bir ısı gerilmeye neden olacak önemli bir termal rötre oluşmakta ve sonuç olarak malzemenin mekanik özellikleri azalmaktadır [51, 52]. Bu bulgu, jeopolimer malzemelerin mekanik mukavemeti ile su içeriği arasındaki kuvvetli ilişkiyi ortaya koyan bir etkidir [32]. Ayrıca, hamurun sıcaklığının kısa sürede çok fazla artması, polikondansasyon aşamalarını hızlandırmakta ve jeopolimerik jelin oluşumu daha erken döneme denk gelmektedir. Böylece, alüminosilikat kaynağı iyi bir şekilde çözülebilmek için yeterli zaman bulamamaktadır. Yeterince tamamlanamayan çözünme reaksiyonları sonucunda, daha sonraki polikondansasyon reaksiyonları için gereken çözülmüş bileşenler reaksiyon ortamında yeterli miktarda olmadığından, daha iyi gelişmiş jel yapısının oluşumu engellenmektedir. Burada tespit edilen sonuca benzer bulgular, yüksek fırın cürufu esaslı [29] ve kömür dip külü esaslı [32] jeopolimer malzemelerin de mikrodalgada uzun süre kürlenmesiyle tespit edilmiştir.

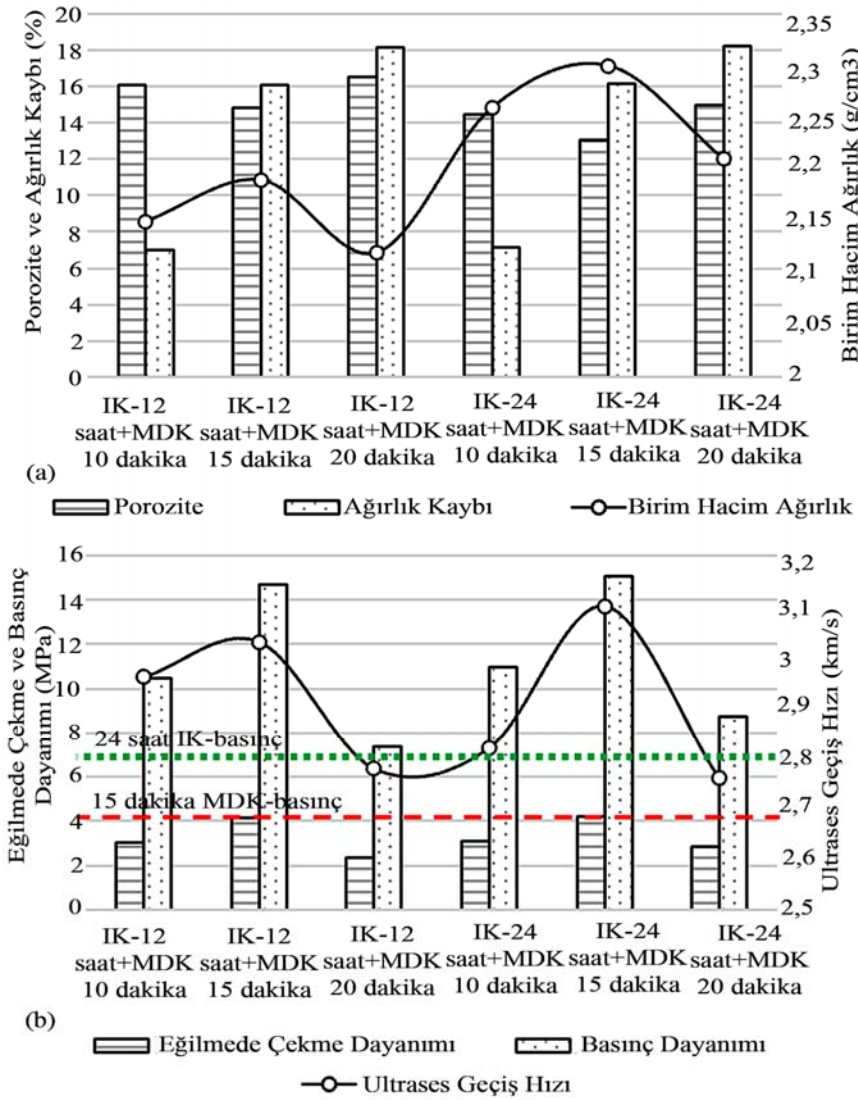
Geleneksel ısı kürü ve mikrodalga kürü karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, mikrodalgada 15 dakikada elde edilen eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri (sırasıyla 1,41 ve 4,37 MPa), geleneksel ısı küründe 12 saatte elde edilen değerlerden (sırasıyla 1,12 ve 3,50 MPa) yaklaşık 1,25 kat daha yüksektir. Bir diğer çalışmada [28], uçucu kül esaslı jeopolimerin 200 W mikrodalgada 10 dakikada kürlenmesiyle elde edilen dayanım değerlerinin 90°C ve 120°C etüvde 30, 45 ve 60 dakika kürlenmeye nazaran daha yüksek olması, bu araştırma bulgularıyla uyum göstermesi bakımından önemlidir. Buradan mikrodalga radyasyonunun, geleneksel ısı kürüne nazaran, jeopolimerizasyonun aktivasyon enerjisini aştığı ve jeopolimerleşme reaksiyonlarının gelişimini hızlandırdığı anlaşılabilmektedir. Geleneksel ısıtmanın aksine, mikrodalgaların etkileşimi, hızlandırılmış yoğunlaşmaya yol açan daha düşük porozite sağlamakta ve böylece daha yüksek mekanik özellikler geliştirmektedir [31]. Geleneksel ısı küründe işlem süresi, malzemenin yüzeyinden gövdesine doğru gerçekleşen ısı akışı ile sınırlıdır. Geleneksel ısıtma yavaştır, ayrıca yüzeyler, kenarlar ve köşeler malzeme gövdesinden daha fazla ısındığından ısıtma homojen değildir [53]. Diğer yandan, 15 dakika mikrodalga küründe elde edilen daha yüksek dayanım, mikrodalga enerjisinin jeopolimer matrisine daha iyi nüfuz etme kabiliyetinden, ısının doğrudan malzemenin gövdesine nüfuz etmesinden ve homojen bir ısıtma sağlanmasından kaynaklanabilir. 15 dakikalık mikrodalga uygulaması reaksiyon süresinin kısalmasına ve mukavemet kazanımından sorumlu hidrasyon ürünlerinin artmasına neden olmuştur. Özellikle, geleneksel ısı kürü uygulamasıyla karşılaşılan 12 saatlik süre kaybına nazaran, mikrodalgada 15 dakika kürlenme oldukça önemli bir zaman ve enerji tasarrufu sağlamaktadır.

3.2. Isı + Mikrodalga Kürünün Jeopolimer Malzemenin Özellikleri Üzerindeki Etkileri (The Effects of Heat + Microwave Curing on the Properties of Geopolymer Material)

90°C 'de 12 ve 24 saat ısı kürü ardından 90W mikrodalgada 10, 15 ve 20 dakika uygulanan kombine kür koşulunun jeopolimer malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin gelişimi üzerindeki etkileri Şekil

4'te verilmektedir. 90°C'de gerek 12 saat gerekse 24 saat ısı kürü ardından 10, 15 ve 20 dakika uygulanan mikrodalga kürü, yalnızca ısı kürü veya yalnızca mikrodalga kürü uygulananlara nazaran, numunelerin porozitesinde azalmayı, birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilmede çekme ve basınç dayanımlarında ise artmayı beraberinde getirmiştir. 12 saat ısı kürü ardından mikrodalga uygulaması, 24 saat ısı + mikrodalga kürüne nazaran özelliklerdeki artış oranının daha fazla olmasını sağlamıştır. Örneğin, yalnızca 12 saat ısı kürüyle üretilen numunelere nazaran 12 saat ısı + 15 dakika mikrodalga uygulaması basınç dayanımında yaklaşık 4,2 katlık bir artış sağlarken (3,5 MPa'dan 14,7 MPa'a), 24 saat ısı kürüyle üretilen numunelere nazaran 24 saat ısı + 15 dakika mikrodalga uygulaması bunun yaklaşık yarısı kadar artış (2,05 kat, 7,31 MPa'dan 15,05 MPa'a) sağlayabilmiştir. Bunun temel nedeni, 24 saatlik ısı küründe jeopolimerleşmenin tamamlanmaya daha yakın olması, yani sistemde daha fazla miktarda üç boyutlu amorf alüminosilikat jeli oluşmasıdır. Yani, optimum ısı kürü sonrasında tamamlanmaya başlayan jel yapısı, daha sonraki mikrodalga küründe daha kısıtlı miktarda yeni jel oluşturmaktadır. Öte yandan, 12 saatlik ısı küründe jeopolimer jel

oluşumu henüz tamamlanmadığından, ek olarak uygulanan mikrodalga kürünün özellikleri geliştirmedeki etkinliği daha büyüktür. Hem 12 hem de 24 saat ısı kürünün ardından mikrodalga kürü süresinin 10 dakikadan 15 dakikaya artırılması fiziksel ve mekanik özellikleri arttırmış olup bunun nedeni ideal sürede uygulanan mikrodalga kürünün malzemede jel oluşturma mekanizmalarını olumlu yönde etkilemesidir. Ancak, burada dikkat edilmesi gereken, yalnızca mikrodalga uygulamasıyla kıyaslandığında, ısı kürü + mikrodalga kombine kür yöntemi uygulamasının daha yüksek mekanik özelliklere sahip malzeme üretimine imkân vermesidir. Diğer yandan, mikrodalgada kür süresinin 20 dakikaya artırılması, fiziksel özelliklerin bozulmasına ve mukavemetin düşmesine yol açmıştır. Bunun nedeni ise ideal mikrodalga süresinden daha uzun mikrodalgaya maruz kalmanın numunelerin fazlaca ısınmasına bağlı olarak gerçekleşen rötre ve termal gerilmelere bağlı çatlaklardır. Yani, ısı + mikrodalga kürü kombine yöntemi uygulandığında en düşük porozite (% 13,03), en yüksek birim hacim ağırlık (2,3 g/cm³), ultrases geçiş hızı (3,1 km/s), eğilmede çekme ve basınç dayanımları (sırasıyla 4,22 ve 15,05 MPa) değerleri 90°C'de 24 saat ısı kürü ardından 90



Şekil 4. Jeopolimer malzemenin özelliklerinin gelişimi üzerinde ısı + mikrodalga kürü koşullarının etkileri: (a) fiziksel özellikler; (b) mekanik özellikler (Effects of heat + microwave curing conditions on the development of properties of geopolymer material: (a) physical properties; (b) mechanical properties)

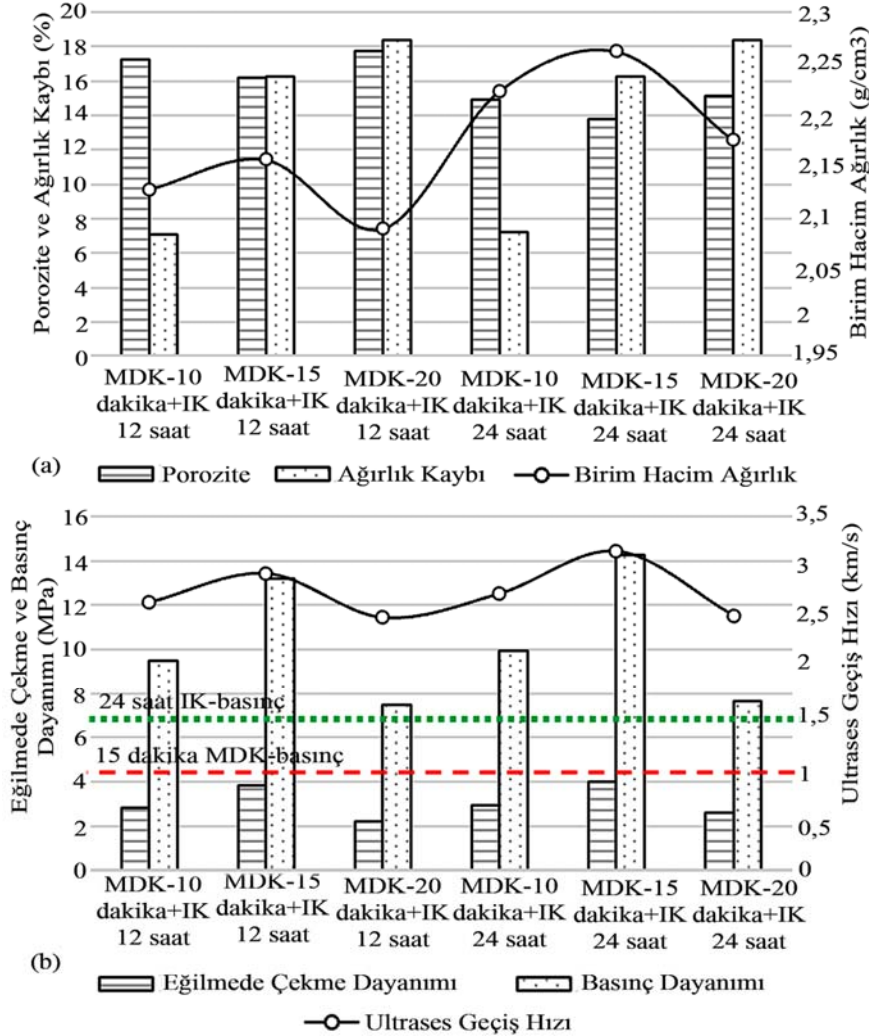
W'ta 15 dakika uygulanan mikrodalga kürüyle elde edilmiştir. 90°C'de 24 saat ısı kürü + 10 dakika mikrodalga küründe elde edilen basınç dayanımına (10,96 MPa) oldukça yakın bir dayanım değerinin (10,50 MPa) aynı sıcaklıkta 12 saat ısı kürü + 10 dakika mikrodalga kürüyle elde edilebilmesi, jeopolimerleşme reaksiyonlarının gelişiminde ilk 12 saatteki etkinliğin daha sonraki 12 saatteki etkinliğe nazaran daha yüksek olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, 90°C'de 24 saat ısı kürü + 15 dakika mikrodalga küründe elde edilen basınç dayanımı (15,05 MPa) ise aynı sıcaklıkta 12 saat ısı + 15 dakika mikrodalga küründe elde edilen dayanımına (14,7 MPa) yakın bir değerdir. Buradan, jeopolimer malzemelerin kombine kür yöntemiyle üretiminde, 24 saatlik ısı kürü yerine 12 saatlik ısı kürü süresinin yeterli olabildiğini ve birbirine yakın özelliklere sahip malzeme üretebilmek için 12 saatlik kürlemeye ek olarak bir 12 saat daha kürleme yapmanın gereksiz olduğu anlaşılmaktadır.

3.3. Mikrodalga + Isı Kürünün Jeopolimer Malzemenin Özellikleri Üzerindeki Etkileri (The Effects of Microwave + Heat Curing on the Properties of Geopolymer Material)

90W mikrodalgada 10, 15 ve 20 dakika kürün ardından 90°C'de 12 ve 24 saat ısı kürü uygulanan kombine kür koşulunun jeopolimer

malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin gelişimi üzerindeki etkileri Şekil 5'te verilmektedir.

10, 15 ve 20 dakika uygulanan mikrodalga kürü ardından 90°C'de ısı kürü uygulaması, yalnızca ısı veya mikrodalga kürü uygulanan numunelerle kıyaslandığında, porozitede azalmayı, birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilmede çekme ve basınç dayanımlarında artmayı beraberinde getirmiştir. Mikrodalga kür periyodunun 10 dakikadan 15 dakikaya artırılması, fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirmiş olup bunun nedeni ideal mikrodalga periyodunun jeopolimer jel üretim reaksiyonlarını olumlu yönde etkilemesidir. Diğer yandan, mikrodalgada kür süresinin 20 dakikaya artırılması, daha yüksek sıcaklıklar nedeniyle oluşan termal gerilmelerden dolayı harcın daha boşluklu, çatlaklı bir yapıya dönüşmesine ve böylece mukavemetin düşmesine yol açmıştır. Yani mikrodalga + ısı kürü kombine yöntemi uygulandığında en düşük porozite (% 13,76), en yüksek birim hacim ağırlık (2,26 g/cm³), ultrases geçiş hızı (3,16 km/s), eğilmede çekme ve basınç dayanımları (sırasıyla 4,00 ve 14,23 MPa) değerleri 90W'ta 15 dakika uygulanan mikrodalga kürü ardından uygulanan 90°C'de 24 saat ısı kürüyle elde edilmiştir. Bu mekanik özellikler, yalnızca ısı ve yalnızca mikrodalga kürüyle elde edilen sonuçlara göre oldukça yüksektir. Bu bulgu, literatürde yer alan



Şekil 5. Jeopolimer malzemenin özelliklerinin gelişimi üzerinde mikrodalga + ısı kürü koşullarının etkileri: (a) fiziksel özellikler; (b) mekanik özellikler (Effects of microwave + heat curing conditions on the development of properties of geopolymer material: (a) physical properties; (b) mechanical properties)

uçucu kül esaslı jeopolimer harcın 5 dakika mikrodalga kürü ardından 65°C'de 6 saat ısı kürü sonucunda elde edilen basınç dayanımının, aynı sıcaklıkta 24 saat etüvde kürlenen kontrol harcından daha yüksek değerde [31] olmasıyla uyum göstermektedir. Bu çalışmada mikrodalga + ısı kürüyle elde edilen dayanım değerleri, ısı + mikrodalga küründe elde edilen değerlere nazaran daha düşüktür. Bu durum, ilk olarak uygulanan mikrodalga ısıtması altında, reaksiyonların gelişimi için gereken suyun bir miktarının hızlı bir şekilde buharlaşması ve bundan dolayı alüminosilikat kaynağındaki SiO₂ ve Al₂O₃ bileşenlerinin yeterince çözünmesini engellemesinden kaynaklanabilmektedir.

15 dakika mikrodalga kürü + 90°C'de 12 saat ısı kürüyle üretilen numunelerin eğilme çekme (3,85 MPa) ve basınç dayanımı (13,2 MPa) değerlerinin 15 dakika mikrodalga kürü + 90°C'de 24 saat ısı kürüyle üretilen numunelerdekilere nazaran (sırasıyla 4,00 ve 14,23 MPa) oldukça yakın olması, 12 saatlik bir ısı kürünün yeterli olduğunu ve ısı kürü süresinin 24 saate artırmanın gereksiz olduğunu göstermektedir. Buna benzer olarak, 10 dakika mikrodalga kürü + 90°C'de 12 saat ısı kürüne maruz bırakılan numuneler ile 10 dakika mikrodalga kürü + 90°C'de 24 saat ısı kürüyle üretilen numunelerin özellikleri de birbirine oldukça yakındır (Şekil 5). Sözü edilen ısı kürü süresinin 24 saat yerine 12 saat olarak uygulanmasıyla, üretim sırasında tüketilen enerji ve zaman kaybının azalması sağlanmaktadır.

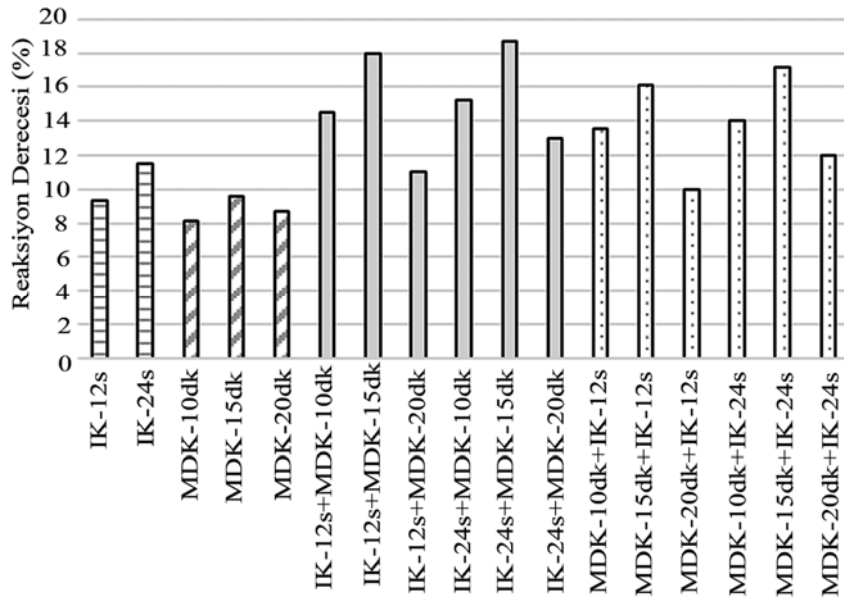
Malzemenin dona karşı direnci açısından önemli bir özelliği olan doyma katsayısı, malzemenin toplam gözeneklerini ne kadar su ile doldurduğunu gösterir. Harç türevi malzemelerde gözeneklerin bir kısmı açık, bir kısmı ise dışarıya kapalıdır ve su emme deneyinde su emmezler. Malzemenin kılcal boşlukları tamamen su ile doluyorsa, bu su donduğunda hacmini % 10 oranında genişletecek yer bulamamakta ve oluşturduğu buz basıncı, malzemenin yüzey delaminasyonuna, parçalanmasına veya çatlamasına neden olabilmektedir. Malzemenin gözenekleri % 80 oranında suya doymuşsa, bu durumda suyun buza dönüşerek genişlemesi için yeterli boşluk vardır ve malzeme donmadan etkilenmez. Bu nedenle malzemenin donma dayanımı, doyma derecesinin % 80 veya daha az olmasına bağlıdır. Bu çalışmada farklı kür yöntemleriyle üretilen bütün numunelerin doyma derecesi yaklaşık % 59 olduğundan, söz konusu jeopolimer malzemenin don etkilerine karşı dayanıklı olduğu söylenebilmektedir.

3.4. Kür Yöntemlerinin Reaksiyon Derecesi Üzerindeki Etkileri (The Effects of Curing Methods on Degree of Reaction)

Çalışmada üretilen bütün numunelere ait reaksiyon derecesi değerleri Şekil 6'da sunulmaktadır. Buna göre, yalnızca ısı etkisinde kürlemede, kür periyodunun artması reaksiyon derecesini arttırmaktadır. Mikrodalga küründe, ideal mikrodalga süresine kadar (15 dakika) reaksiyon derecesi artmakta ve ideal kür periyodunun sonrasında azalmaktadır. Geleneksel ısı küründe 12 saatte elde edilen reaksiyon derecesine (% 9,3) çok yakın bir değer mikrodalgada 15 dakikada (% 9,6) elde edilebilmesi, mikrodalga radyasyonu, geleneksel ısıtmadaki 12 saatlik bir zaman kaybının önlenildiğini gözler önüne sermektedir. En yüksek reaksiyon derecesi (% 18,67) 24 saat 90°C'de ısı etkisiyle kürlemenin ardından 15 dakika mikrodalga kürüne tabi tutulan numunelerde tespit edilmiştir. Öncelikle ısı kürü ve bunun ardından mikrodalga kürü uygulaması, mikrodalga + ısı kürü uygulamalarına nazaran daha yüksek reaksiyon dereceleri sağlamaktadır. Nitekim bu sonuçlar, önceki bölümlerde sözü edilen ultrases geçiş hızı, eğilme çekme ve basınç dayanımlarıyla uyumlu olması bakımından önemlidir. Yani jeopolimerleşme reaksiyonlarının derecesi, malzemenin mekanik özelliklerinin gelişimiyle takip edilebilmektedir. Özellikle basınç dayanımı jeopolimerleşme derecesinin bir göstergesidir [54].

3.5. Kür Yöntemlerini Jeopolimer Malzemenin Enerji Etkinliği Bakımından Değerlendirme (Evaluating Curing Methods in terms of Energy Efficiency of Geopolymer Material)

Yapı malzemelerinin üretiminde tüketilen enerji miktarı, özellikle enerji etkin tasarımın öneminin anlaşıldığı günümüz yapı sektöründe göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür. Bu çalışmada, farklı kür yöntemleriyle geliştirilen doğal puzolan esaslı jeopolimer harcın mekanik özellikleri, toplam kür süresi ve kürleme sırasında tüketilen elektrik enerjisi miktarı Tablo 3'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Doğru bir kıyaslama yapabilmek için, her bir kür yönteminde yalnızca en yüksek mekanik dayanımı veren numune verileri tabloya eklenmiştir. Kürleme sırasında tüketilen toplam elektrik enerjisi miktarı hesaplanırken etüv ve mikrodalga cihazlarının bir saatte harcadığı elektrik tüketimi uygulanan kür süresiyle çarpılmıştır.



Şekil 6. Farklı kür yöntemleriyle üretilen jeopolimer numunelere ait reaksiyon dereceleri
(Reaction degrees of geopolymer specimens produced with different curing methods)

Tablo 3. Farklı kür yöntemleriyle üretilen jeopolimer harcın mekanik özelliklerinin ve kürlenme sırasında tüketilen elektrik enerjisi miktarının karşılaştırılması (Comparison of the mechanical properties of geopolymer mortar produced with different curing methods and the amount of electrical energy consumed during curing)

Numune	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)	Toplam kür süresi	Kürleme cihazlarının elektrik tüketimi (kWh)	Kür sırasında elektrik tüketimi (kWh)
İK-24 saat	2,80	7,31	24 saat	2,00	48,00
MDK-15 dakika	1,41	4,37	15 dakika	1,40	0,35
İK-24 saat + MDK 15 dakika	4,22	15,05	24 saat + 15 dakika	2,0; 1,4	48,35
MDK 15 dakika + İK-24 saat	4,00	14,23	24 saat + 15 dakika	1,4; 2,0	48,35

Tablo 3'e göre, 24 saat ısı kürüyle üretilen jeopolimer malzeme 2,80 MPa eğilmede çekme dayanımı ve 7,31 MPa basınç dayanımına sahip olup etüvde üretim sırasında toplam 48 kWh enerji tüketilmiştir. 15 dakika mikrodalga küründe ise etüv kürüne nazaran daha düşük mekanik özellikler (1,41 MPa eğilme ve 4,37 MPa basınç) elde edilmesine rağmen, üretim sırasında yalnızca 0,35 kWh enerji tüketilmiştir. Mikrodalga kürü, jeopolimerleşmenin çözünme ve jel oluşumu aşamalarını hızlandırdığından ve mikrodalgada geleneksel ısıtma teknolojilerine nazaran ısıtma daha homojen olduğundan malzemenin dayanımı kısa süre içerisinde gelişmektedir. Ayrıca, mikrodalga kürünün 24 saat ısı kürüne nazaran çok daha düşük bir enerji tüketimine yol açmasının temel nedeni, mikrodalgada sağlanan homojen hacimsel ısıtmanın enerji tüketimini önemli ölçüde azaltması ve hacimsel ısıtma işleminin, geleneksel fırınlarda uygulanan dirençli ısıtmadan daha verimli olmasıdır [27].

Isı ve mikrodalga kürünün kombine bir kür yöntemi olarak birlikte uygulanması, malzemenin mekanik özelliklerini önemli derecede geliştirmektedir. Kombine kür yöntemlerinin her ikisinde de tüketilen toplam elektrik enerjisi miktarı (48,35 kWh) diğer koşullara kıyasla daha yüksektir. Ancak, 24 saatlik ısı kürüyle kıyaslandığında, kombine yöntemle sadece 0,35 kWh fazladan enerji tüketimi, malzemenin basınç dayanımının yaklaşık 2 kat artışı sağlamaktadır. Bu durum geleneksel ısı kürünü, öncesinde veya sonrasında, mikrodalga kürüyle desteklemenin malzeme özellikleri açısından olumlu etkilerini göstermektedir. Ancak, literatürde yer alan bilgilere göre, mikrodalga teknolojisinin endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmasından önce birtakım dezavantajların çözülmesi gerekmektedir. Örneğin, mikrodalga küründe enerji tüketim miktarı uygulama ölçeğine bağlıdır [55] ve küçük ölçekte geleneksel ısıtmadan daha enerji verimlidir. Bu çalışmada küçük ölçekli bir uygulama yapılmıştır. Daha uzun kür süresinde mikrodalga ısıtmanın verimliliği daha düşük olabilmektedir [56]. Ayrıca, elektrikten mikrodalga enerjisine enerji dönüşüm verimliliği yaklaşık % 50 olup, elektrik-buhar dönüşümü veya fosil yakıt-buhar dönüşümüne kıyasla (sırasıyla % 90 ve % 65) daha düşüktür. Bundan dolayı, büyük ölçekli uygulamalarda mikrodalga kürüyle jeopolimer üretiminin enerji verimliliği detaylı bir şekilde araştırılmalıdır [27].

4. Sonuçlar (Conclusions)

Doğal puzolan esaslı jeopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin ısı ve mikrodalga kürünün birlikte uygulandığı "kombine kür yöntemleri" ile geliştirilmesi olanaklarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, sıcaklık, süre ve nem gibi önemli kür koşullarının etkinliği belirlenmiştir. Ayrıca, farklı kür yöntemlerinin uygulanma sırasının değiştirilmesi sonucunda malzeme özelliklerinin değişimi tespit edilmiştir. Kombine kür yöntemlerinin diğer kür yöntemlerine nazaran avantaj ve dezavantajlarının belirlenebilmesi için yalnızca ısı ve yalnızca mikrodalga kürleri de uygulanmış ve gerek fiziksel/mechanik özellikler gerekse üretim süreci ve üretimde tüketilen enerji miktarı

saptanmıştır. Bu bağlamda, deneysel çalışma bulgularından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir:

- Doğal Daçta Puzolanı esaslı jeopolimer harcın fiziksel ve mekanik özelliklerinin mikrodalga kürüyle, geleneksel ısı kürüne nazaran, daha kısa sürede ve daha az enerji harcanarak geliştirilebilmesi mümkündür.
- Yalnızca ısı kürüne (90°C) tabi tutulan numunelerde kür süresinin 12 saatten 24 saate ve yalnızca mikrodalga kürüne (90 W) tabi tutulan numunelerde 10 dakikadan 15 dakikaya artırılması, malzemenin daha yüksek mekanik özelliklere ulaşmasını sağlamaktadır.
- Mikrodalga kür periyodunu ideal süreden daha fazla arttırmak önemli miktarda su kaybına yol açmaktadır. Bu durumda, bünyede rötre çatlakları oluşmakta ve malzeme özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir.
- Mikrodalgada 15 dakikada elde edilen mekanik mukavemet değerleri, geleneksel ısı küründe 12 saatte elde edilen değerlerden daha yüksektir. Özellikle, ısı kürüyle karşılaşılan 12 saatlik süre kaybına nazaran, mikrodalgada 15 dakika kürlenme oldukça önemli bir zaman ve enerji tasarrufu sağlamaktadır.
- Isı + mikrodalga veya mikrodalga + ısı kürü (kombine kür yöntemi), yalnızca ısı kürü veya yalnızca mikrodalga kürüne nazaran daha yüksek fiziksel ve mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlamıştır.
- 90°C'de 12 saat ısı kürü ardından mikrodalga uygulaması, 24 saat ısı + mikrodalga kürüne nazaran özelliklerdeki artış oranının daha fazla olmasını sağlamıştır. Öte yandan, 12 saatlik ısı küründe jeopolimer jel oluşumu henüz tamamlanmadığından, ek olarak uygulanan mikrodalga kürünün özellikleri geliştirmedeki etkinliği daha büyüktür.
- En yüksek fiziksel ve mekanik özellikler ve reaksiyon derecesi 90°C'de 24 saat ısı + 15 dakika mikrodalga kürüyle elde edilmiştir.
- Jeopolimerleşme reaksiyonlarının gelişiminde ilk 12 saatteki etkinlik daha sonraki 12 saatteki etkinliğe nazaran daha yüksektir.
- Mikrodalga kürünün ısı kürüne nazaran çok daha enerji etkin olduğu tespit edilmiştir. Isı ve mikrodalga kürünün kombine bir kür yöntemi olarak birlikte uygulanması, yalnızca ısı kürüne nazaran oldukça az enerji tüketim farkına yol açmasına rağmen, malzemenin mekanik özelliklerini yaklaşık iki kat geliştirmesi bakımından önemlidir.

Kaynaklar (References)

1. Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders, In F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. Chindaprasirt (Eds.), Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, 2, 19-47, 2015.
2. RILEM TC 224-AAM, State-of-the-Art Report, Alkali Activated Materials, 2014.
3. Zhang, Z., Provis, J.L., Reid, A., Wang, H., Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction, Construction and Building Materials, 56, 113-127, 2014.

4. Athira, V.S., Bahurudeen, A., Saljas, M., Jayachandran, K., Influence of different curing methods on mechanical and durability properties of alkali activated binders, *Construction and Building Materials*, 299, 123963, 2021.
5. Jiang, D., Shi, C., Zhang, Z., Recent progress in understanding setting and hardening of alkali-activated slag (AAS) materials, *Cement and Concrete Composites*, 134, 104795, 2022.
6. Nath, P., Sarker, P.K., Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature, *Cement and Concrete Composites*, 55, 205–214, 2015.
7. Wang, K., Shah, S.P., Mishulovich, A., Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders, *Cement and Concrete Research*, 34, 2, 299–309, 2004.
8. Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., Rangan, B.V., On the development of fly ash-based geopolymer concrete, *ACI Materials Journal*, 101, 467–472, 2004.
9. Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C.M., Liew, Y.M., Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers, *Physics Procedia*, 22, 305–311, 2011.
10. Muñiz-Villarreal, M.S., Manzano-Ramírez, A., Sampieri-Bulbarela, S., Ramón Gasca-Tirado, J., Reyes-Araiza, J.L., Rubio-Ávalos, J.C., Pérez-Bueno, J.J., Apatiga, L.M., Zaldivar-Cadena, A., Amigó-Borrás, V., The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer, *Materials Letters*, 65, 6, 995–998, 2011.
11. Ferone, C., Colangelo, F., Cioffi, R., Montagnaro, F., Santoro, L., Mechanical performances of weathered coal fly ash based geopolymer bricks, *Procedia Engineering*, 21, 745–752, 2011.
12. Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, *Cement and Concrete Composites*, 29, 3, 224–229, 2007.
13. Yurt, U., High performance cementless composites from alkali activated GGBFS, *Construction and Building Materials*, 264, 120222, 2020.
14. Noushini, A., Castel, A., The effect of heat-curing on transport properties of low- calcium fly ash-based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 112, 464–477, 2016.
15. Öztürk, Z.B., Atabey, İ.İ., Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer mortars at high temperatures produced with ceramic sanitaryware waste, *Ceramics International*, 48, (9), 12932-12944, 2022.
16. Çelikten, S., Sandemir, M., Akçaözöglü, K., Effect of calcined perlite content on elevated temperature behaviour of alkali activated slag mortars, *Journal of Building Engineering*, 32, 101717, 2020.
17. Çelikten, S., Erdoğan, G., Effects of perlite/fly ash ratio and the curing conditions on the mechanical and microstructural properties of geopolymers subjected to elevated temperatures, *Ceramics International*, 48, 19, Part A, 27870-27877, 2022.
18. Tuyan, M., Andiç-Çakır, Ö., Ramyar, K., Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer, *Composites Part B: Engineering*, 135, 242–252, 2018.
19. González-García, D.M., Téllez-Jurado, L., Jiménez-Álvarez, F.J., Zarazua-Villalobos, L., Balmori-Ramírez, H., Evolution of a natural pozzolan-based geopolymer alkalinized in the presence of sodium or potassium silicate/hydroxide solution, *Construction and Building Materials*, 321, 126305, 2022.
20. Rovnaník, P., Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 24, 7, 1176–1183, 2010.
21. Ma, Y., Hu, J., Ye, G., The pore structure and permeability of alkali activated fly ash, *Fuel*, 104 771–780, 2013.
22. Görhan, G., Kürklü, G., The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, *Composites Part B: Engineering*, 58, 371–377, 2014.
23. Çelikten, S., Atabey, İ.İ., Su içeriği ve ısı kür süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10, 1, 328-332, 2021.
24. Mahmut, O., Emiroğlu, M., Elazığ ferrokrom çürufunun alkali aktive edilmiş harç üretiminde kullanım potansiyelinin araştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28, 1, 23-34, 2016.
25. Li, Q., Chen, S., Zhang, Y., Hu, Y., Wang, Q., Zhou, Q., Yan, Y., Liu, Y., Yan, D., Effect of curing temperature on high-strength metakaolin-based geopolymer composite (HMGC) with quartz powder and steel fibers, *Materials*, 15, 3958, 2022.
26. Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., Yue, C., Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer, *Applied Clay Science*, 43, 2, 218–223, 2009.
27. Sun, Y., Zhang, P., Hu, J., Liu, B., Yang, J., Liang, S., Xiao, K., Hou, H., A review on microwave irradiation to the properties of geopolymers: Mechanisms and challenges, *Construction and Building Materials*, 294, 123491, 2021.
28. Graytee, A., Sanjayan, J.G., Nazari, A., Development of a high strength fly ash-based geopolymer in short time by using microwave curing, *Ceramics International*, 44, (7), 8216-8222, 2018.
29. El-Feky, M.S., Kohail, M., El-Tair, A.M., Serag, M.I., Effect of microwave curing as compared with conventional regimes on the performance of alkali activated slag pastes, *Construction and Building Materials*, 233, 117268, 2020.
30. Somaratna, J., Ravikumar, D., Neithalath, N., Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing, *Cement and Concrete Research*, 40, (12), 1688-1696, 2010.
31. Chindaprasirt, P., Rattanasak, U., Taebuanhuad, S., Role of microwave radiation in curing the fly ash geopolymer, *Advanced Powder Technology*, 24, (3), 703-707, 2013.
32. Hong, S., Kim, H., Robust synthesis of coal bottom ash-based geopolymers using additional microwave heating and curing for high compressive strength properties, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 36, (7), 1164-1171, 2019.
33. Bai, C., Deng, Y., Zhou, Q., Deng, G., Yang, T., Yang, Y., Effect of different curing methods on the preparation of carbonized high-titanium slag based geopolymers, *Construction and Building Materials*, 342, Part A, 128023, 2022.
34. Robayo-Salazar, R.A., Gutierrez, R.M., Natural volcanic pozzolans as an available raw material for alkali-activated materials in the foreseeable future: a review, *Construction and Building Materials*, 189, 109–118, 2018.
35. Gultekin, A., Ramyar, K., Investigation of high-temperature resistance of natural pozzolan-based geopolymers produced with oven and microwave curing, *Construction and Building Materials*, 365, 130059, 2023.
36. Ercan, T., Günay, E., Bas, H., Can, B., Daça Yarımadasındaki kuvaterner yaşlı volkanik kayaçların petrolojisi ve kokensel yorumu, *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 97/98 21–23, 1984.
37. TS EN 196–6, Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 6: İncelik Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2010.
38. ASTM D 854-10, Standard Test Method for Gravity of Soils by Water Pycnometer, Annual Book of ASTM Standards, 2010.
39. TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2009.
40. ASTM C1437-20, Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. West Conshohocken, United States, 2020.
41. TS EN 1015-10, Kâgir Harcı - Deney Metotları - Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütesinin Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2001.
42. TS EN 14579, Doğal Taşlar - Deney Metotları - Ses Hızı İlerlemesinin Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2006.
43. Ohsawa, S., Asaga, K., Goto, S., Daimon, M., Quantitative determination of fly ash in the hydrated fly ash-CaSO₄2H₂O-Ca(OH)₂ system, *Cement and Concrete Research*, 15, (2), 357–366, 1985.
44. Criado, M., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description, *Fuel*, 89, (11), 3185–3192, 2010.
45. Fernandez-Jimenez, A., De La Torre, A.G., Palomo, A., Lopez-Olmo, G., Alonso, M.M., Aranda, M.A.G., Quantitative determination of phases in the alkaline activation of fly ash. Part II: Degree of reaction, *Fuel*, 85, (14–15), 1960-1969, 2006.
46. Samantasinghar, S., Singh, S., Effects of curing environment on strength and microstructure of alkali-activated fly ash-slag binder, *Construction and Building Materials*, 235, 117481, 2020.
47. Tanaçan, L., Kurugöl, S., Ersoy, H.S., Investigation of ultrasonic pulse velocity-strength relationship of lime-pozzolan mortars, *Fourth International Ecomaterials Symposium*, Bayamo, Cuba, 2009.
48. Gubb, T.A., Baranova, I., Allan, S.M., Fall, M.L., Shulman, H.S., Kriven, W.M., Microwave enhanced drying and firing of geopolymers, *Developments in Strategic Materials and Computational Design II*, Wiley, New Jersey, 35, 2011.

49. Hong, S., Kim, H., Effect of microwave energy on rapid compressive strength development in coal bottom ash based geopolymers, Poster session presented at the Fall Symposium of The Korean Inst. Chem. Eng., Korea, 2018.
50. Davidovits, J., Geopolymer chemistry and applications, 4th Ed., Geopolymer Institute, France, 2015.
51. Abdulkareem, O.A., Mustafa Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I., Saif, A.A., Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 50, 377-387, 2014.
52. Zhang, H.Y., Kodur, V., Qi, S.L., Cao, L., Wu, B., Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications, *Construction and Building Materials*, 55, 38-45, 2014.
53. Giasuddin, H.M., Sanjayan, J.G., Ranjith, P.G., Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions, *Fuel*, 107, 34-39, 2013.
54. Galiano, Y.L., Pereira, C.F., Izquierdo, M., Contributions to the study of porosity in fly ash-based geopolymers. Relationship between degree of reaction, porosity and compressive strength, *Materiales de Construccion*, 66, 1-14, 2016.
55. Peng, L., Appels, L., Su, H., Combining microwave irradiation with sodium citrate addition improves the pre-treatment on anaerobic digestion of excess sewage sludge, *Journal of Environmental Management*, 213, 271-278, 2018.
56. Razzaq, T., Kappe, C.O., On the energy efficiency of microwave-assisted organic reactions, *ChemSusChem*, 1, 123-132, 2008.
57. Yurt, Ü., Emiroğlu, M., Zeolit ikameli geopolimer betonlarda kür şartlarının etkileri, *Academic Platform Journal of Engineering and Science* 8-2, 396-402, 2020.
58. Wazien, A.Z.W., Al Bakri Abdullah, M.M., Razak, R.A., Rozainy, M.A.Z., Tahir, M.F.M., Strength and density of geopolymer mortar cured at ambient temperature for use as repair material, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133, 012042, 2016.

