Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 39:4 (2024) 2239-2251

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

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.

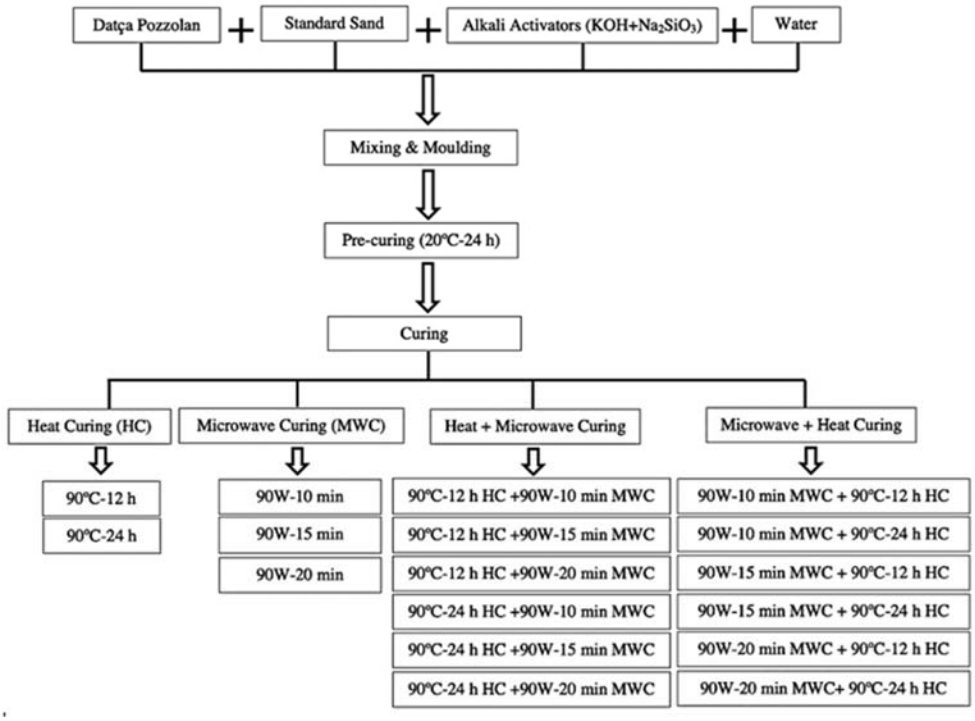


Figure A. Production stages of natural pozzolan-based geopolymer mortar specimens

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.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 39:4 (2024) 2239-2251

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

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/cm^3), 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/cm^3), 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 CO_2 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 CO_2 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 malzemeden beklenilen 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 çalışmasında, 50°C'den daha düşük kür sıcaklıklarında, alüminosilikat kaynağının çözünmesi ve hidroksil bileşenlerinin oluşumunun tamamlanamadığını ve böylece üretilen malzemenin mekanik mukavemetinin düşük olduğunu tespit etmiştir. Yükseltilmiş sıcaklıkta kürleme, alüminosilikat kaynağında bulunan reaktif bileşenlerin daha iyi çözünmesini sağlamakta 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 kürlediği çalışmasında kür sıcaklığındaki artışın malzemenin mekanik özelliklerini artırdığını belirtmiş ve özellikle yüksek sıcaklıklı iklim koşullarına sahip ülkelerde bu malzemelerin kullanımının avantajlı olduğunu vurgulamıştır. Bir diğer araştırmada Noushini ve Castel [14], uçucu kül esaslı jeopolimer bağlayıcıyı 25°C, 75°C ve 90°C'de 24 saat kürlemiş ve ortam koşullarında kürlenen numunelere nazaran sıcaklık etkisiyle kürlenen numunelerin porozite ve kılcal geçirimlilik 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 cüruf 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 arttırılması jeopolimer malzemelerin özelliklerini geliştirmektedir. Tuyan vd. [18], atık kil tuğlası tozundan ürettiği jeopolimeri ortam koşullarında 3 gün kürlediğinde 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 geçirimliliği üzerinde (40°C'de) kür süresinin etkinliğini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, kür süresinin 7 günden 28 güne artmasıyla jeopolimerin su geçirimliliğinin 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 özeliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada, kür sıcaklığının 4 saatten sırasıyla 8 ve 24 saate artırılması sonucunda harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştiği tespit edilmiştir. Bir diğer araştırmada Mahmut ve Emiroğlu [24], öğütülmüş ferrokrom cürufu esaslı jeopolimeri 40°C, 65°C ve 90°C'de 1, 2 ve 4 gün kürlemiştir. En yüksek basınç dayanımı 90°C de 2 gün kürlenen numunelerde tespit edilmiştir. Aynı sıcaklıkta kür süresinin 4 güne arttırılmasıyla 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) kürlediğinde, 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 sağlamakta, malzemenin her yönden eşit ısınmasını sağlamakta, düşük ısı kaybına yol açmakta ve böylece daha yüksek enerji verimliliğini beraberinde getirmektedir [27]. Geleneksel ısı kürü altında, ısıl enerji, 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 sağlanamadığından numunenin yüzeyi ve köşeleri çekirdeğe nazaran çok daha fazla ısınır ve malzeme kalitesi değişebilir [29]. Ayrıca, geleneksel ısıtma yöntemlerinde ısı iletimi ve taşınımı 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 oluşturmaktadır. 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°C'de 48 saatte elde edilen dayanımdan daha yüksek bir değerin 240 W mikrodalgada 120 dakikadan daha kısa sürede sağlanabildiği tespit edilmiştir. Chindaprasirt vd. [31], yine uçucu kül esaslı jeopolimeri 90 W mikrodalgada 5 dakika kürledikten sonra 65°C'de 6 saat etüv kürüne tabi tutmuştur. Elde edilen mukavemetin 65°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°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°C ve 120°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°C'de 12, 24 ve 36 saat ön kürlemeye tabi tuttuktan sonra 700 W mikrodalgada 0-7 dakika kürlemiştir. Etüvde 36 saat kürlenen numunelerin basınç dayanımı 12,8 MPa iken, 3 dakika mikrodalga kürü uygulandıktan sonra önemli miktarda artış (40,5 MPa) göstermiştir. El-Feky vd. [29], cüruf esaslı jeopolimerin özellikleri üzerinde geleneksel kür yöntemlerine (80°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°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°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/mekanik özellikler gerekse üretim süreci ve üretimde tüketilen enerji miktarı saptanarak ideal kür yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Malzeme ve Metot (Materials and Methods)

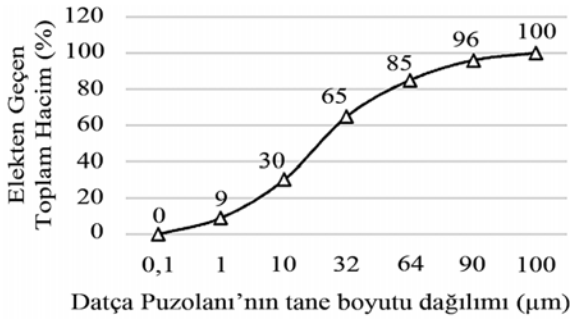
2.1. Hammaddeler (Raw Materials)

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 saflıkta10 molar (M) potasyum hidroksit (KOH) ve ticari sodyum silikat (SS, Na_2SiO_3) kimyasalları kullanılmıştır. Sıvı sodyum silikat % 7,5 Na_2O, % 25,5 SiO_2 ve % 67,0 H_2O içermektedir. Alkali çözeltiler jeopolimer karışımda kullanılmadan 24 saat önce hazırlanarak kapalı bir cam kap içerisinde oda sıcaklığına ulaşıncaya 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'tur. 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 harcın 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 kürlemeye tabi tutulmuştur. Ön kürlemenin ardından kalıptan çıkabilecek hale gelen numuneler farklı kür yöntemlerine tabi tutulmuştur:

(i) Yalnızca geleneksel ısı kürü: Numuneler PE içerisinde 90℃'de havalandırmalı bir etüvde 12 ve 24 saat kürlenmiştir.
(ii) 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.
(iii) Isı + mikrodalga kürü: 90℃'de 12 ve 24 saat ısı kürünün ardından, 90 W mikrodalgada 10, 15 ve 20 dakika uygulanan kombine kür yöntemidir.
(iv) Mikrodalga + ısı kürü: 90 W'ta 10, 15 ve 20 dakika mikrodalga kürünün ardından 90℃'de 12 ve 24 saat ısı kürünün uygulandığı kombine kür yöntemidir.

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

Farklı kür yöntemleriyle üretilen 40×40×160 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 kürleme 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:

$$\text{Ağırlık kaybı } (\%) = [(Gi - Gf)/Gi] \text{ x } 100 \quad (1)$$

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

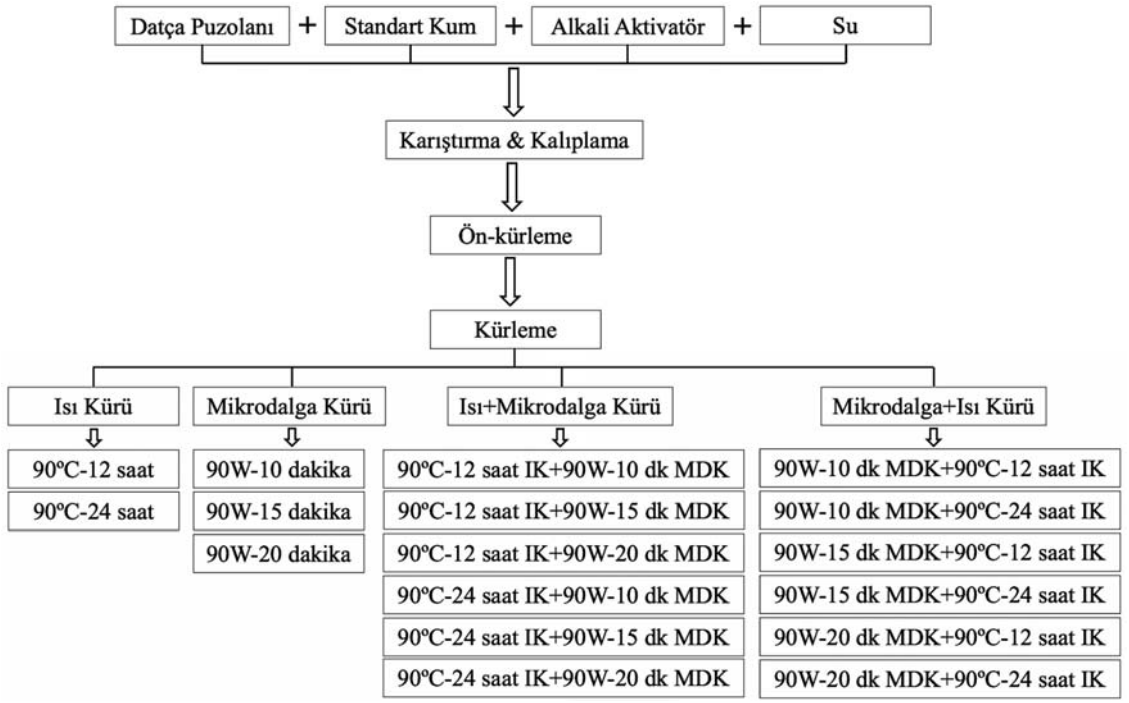
Ohsawa vd. [43], jeopolimerlerin reaksiyon derecesini belirlemek için kapsamlı yöntemler tanımlamıştır. Bununla birlikte, jeopolimer malzemeleri ortam sıcaklığında hidroklorik asit (HCl) ile çözme yöntemi birçok araştırmacı tarafından benimsenmiştir [44, 45]. Bunun için, basınç dayanım deneyi sonrasında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

$$\text{Reaksiyon derecesi } (\%) = 100 - [(mi - mf)/mi] \text{x } 100 \quad (2)$$

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_2SiO_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)

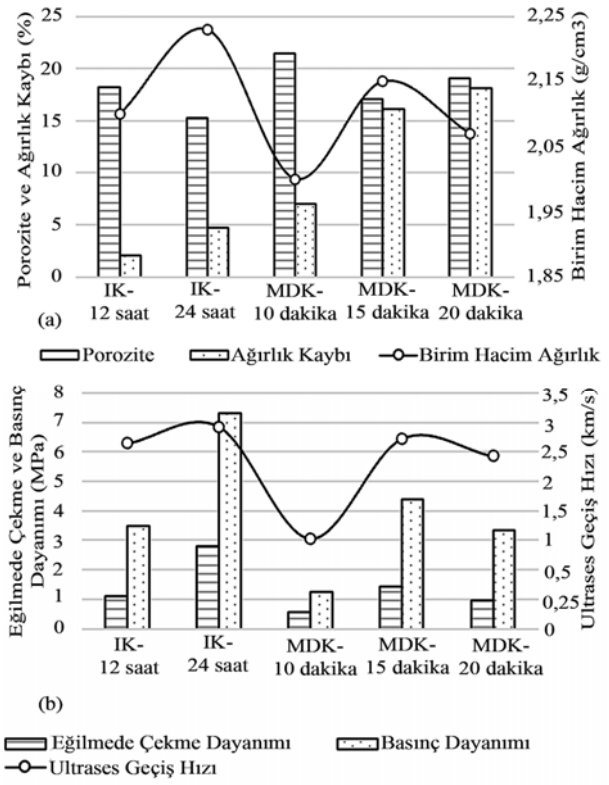
Yalnızca ısı kürü ve mikrodalga kürü uygulanan jeopolimer malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin gelişimi üzerinde kür koşullarının etkileri Şekil 3'te verilmektedir.

Yalnızca ısı kürüne (90°C) tabi tutulan numunelerde kür süresinin 12 saatten 24 saate arttırılması 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/cm^3'ten 2,23 g/cm^3'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 malzemelerin 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 bulunmamakta 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 arttırılması, 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 cürufu 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 doldurmakta 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 kürlenen 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 arttırılması 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 kürlenenlere nazaran daha yüksektir. Kür süresinin 15 dakikaya arttırılması, 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 saldırmak 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 ışınlama 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 $[SiO4]^{4-}$ ve $[AlO4]^{5-}$ 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)

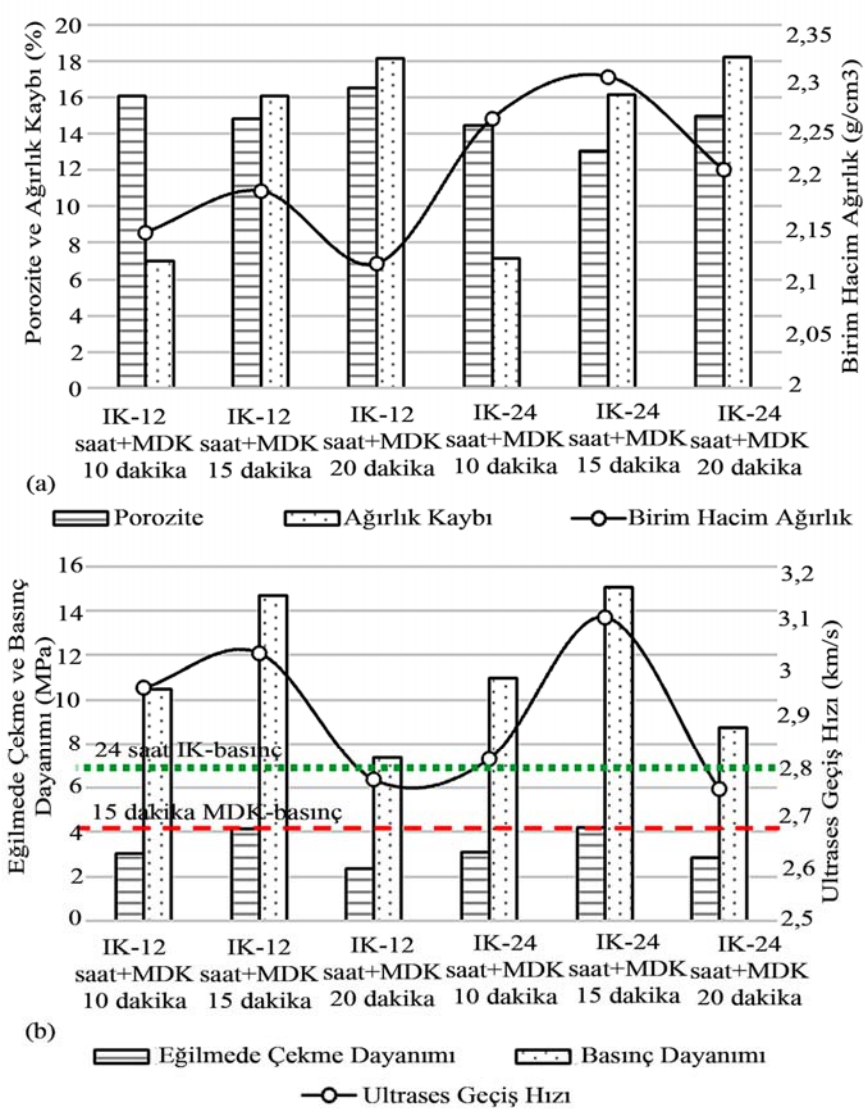
Mikrodalga kür süresinin 20 dakikaya arttırılması, malzeme porozitesinin artmasına ve daha boşluklu hale gelen yapıdan beklenildiği üzere, birim hacim ağırlığının, ultrases geçiş hızının, eğilmede çekme ve basınç dayanımlarının azalmasına yol açmıştır. Yani, mikrodalgada kritik bir kür süresi mevcuttur 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 ışıması ile 200°C'nin çok üzerine çıkabilir [48, 49]. Isıtma sırasında, nispeten düşük bir sıcaklık aralığında (ortam sıcaklığı ila 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 ısıl 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 etkendir [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 çözünebilmek için yeterli zaman bulamamaktadır. Yeterince tamamlanamayan çözünme reaksiyonları sonucunda, daha sonraki polikondansasyon reaksiyonları için gereken çözünmüş 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 araştırmada [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 kürlemeye 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 gelişmektedir [31]. Geleneksel ısı küründe işlem süresi, malzemenin yüzeyinden gövdesine doğru gerçekleşen ısı akış hızı 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 matrise daha iyi nüfuz etme kabiliyetinden, ısının doğrudan malzemenin gövdesine nüfuz etmesinden ve homojen bir ısıtma sağlamasından 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 kürleme 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 arttırılması fiziksel ve mekanik özellikleri arttırmış olup bunun nedeni ideal sürede uygulanan mikrodalganın 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 arttırılması, 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/cm^3), 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



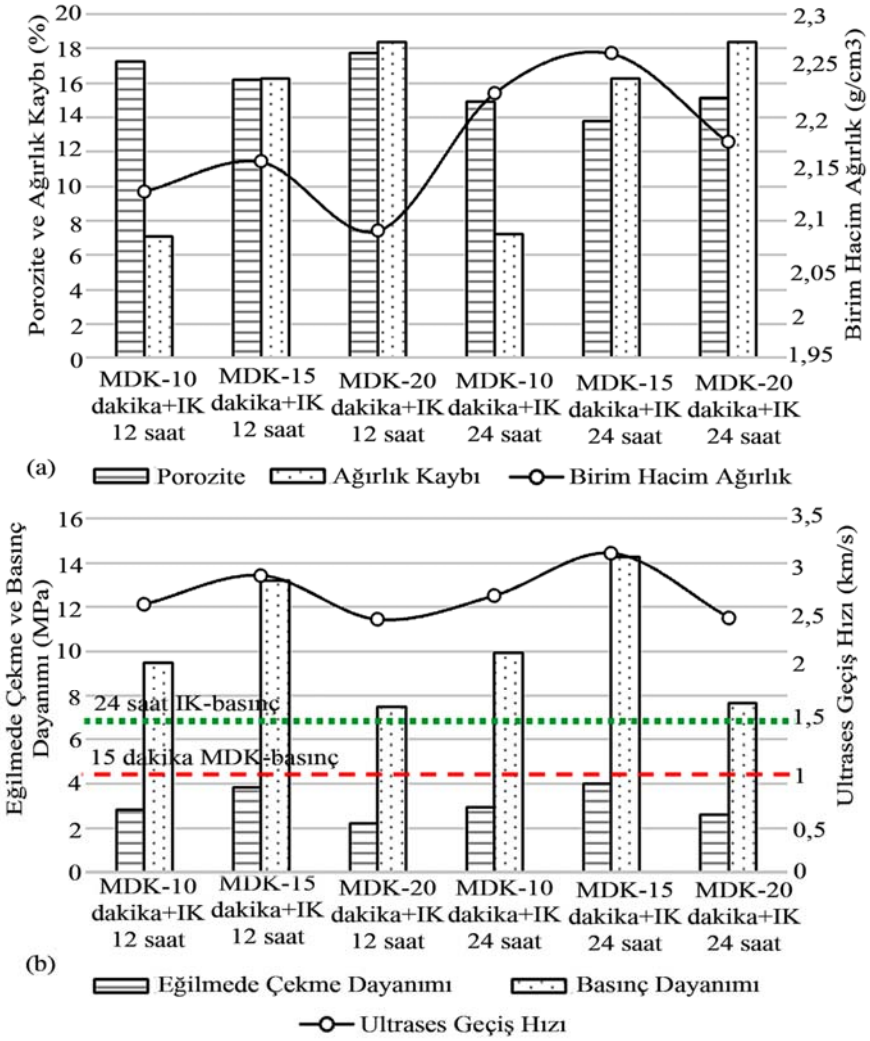
Şekil 4. Jeopolimer malzemenin özelliklerinin gelişimi üzerinde ısı + mikrodalga kürü koşullarının etkileri: (a) fiziksel özellikler; (b) mekanik özellikler (Effects of heat + microwave curing conditions on the development of properties of geopolymer material: (a) physical properties; (b) mechanical 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 arttırılması, 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 arttırılması, 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/cm^3), 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 araştırmada 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 SiO_2 ve Al_2O_3 bileşenlerinin yeterince çözünmesini engellemesinden kaynaklanabilmektedir.

15 dakika mikrodalga kürü + 90°C'de 12 saat ısı kürüyle üretilen numunelerin eğilmede 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.

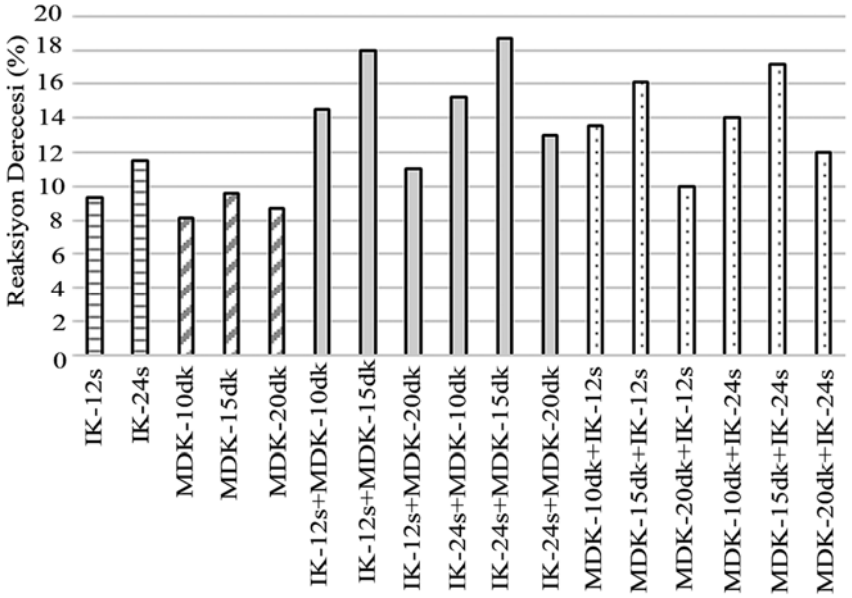
Malzemenin dona karşı direnci açısından önemli bir özelliği olan doyma katsayısı, malzemenin toplam gözeneklerini ne kadar su ile doldurduğunu gösterir. Harç türevi malzemelerde gözeneklerin bir kısmı açık, bir kısmı ise dışarıya kapalıdır ve su emme deneyinde su emmezler. Malzemenin kılcal boşlukları tamamen su ile doluysa, 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 genleşmesi 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 söyleyebilmektedir.

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 değerin mikrodalgada 15 dakikada (% 9,6) elde edilebilmesi, mikrodalga radyasyonuyla, geleneksel ısıtmadaki 12 saatlik bir zaman kaybının önlenebildiğini 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, eğilmede 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 araştırmada, 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 kürleme 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)
IK-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
IK-24 saat + MDK 15 dakika	4,22	15,05	24 saat + 15 dakika	2,0; 1,4	48,35
MDK 15 dakika + IK-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 araştırmada 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 araştırmada, 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/mekanik özellikler gerekse üretim süreci ve üretimde tüketilen enerji miktarı saptanmıştır. Bu bağlamda, deneysel çalışma bulgularından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir:

- Doğal Datça 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 arttırılması, 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 kürleme 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 ımprove 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., Sarıdemir, M., Akçaözoğlu, 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-Çakir, 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 alkalized 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 ısıl 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 cürufunun 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., Datça Yarımadasındaki kuvaterner yaslı 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 Kütlesinin 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-$CaSO_4$-$2H_2O$-$Ca(OH)_2$ 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.

Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Dergi Kurulları

İmtiyaz Sahibi (Yeni)



Prof. Dr. Uğur ÜNAL
GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Türkiye Web

Prof. Dr. Uğur ÜNAL

Gazi Üniversitesi Rektörü

Tarih Eğitimi

Genel Yayın Yönetmeni (Yeni)



Prof. Dr. Fatih AKKURT
GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Türkiye

Çevresel ve Sürdürülebilir Süreçler, Elektrokimyasal Teknolojiler, Malzeme Bilimi ve Teknolojileri

Editör (Yeni)



Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ
GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Türkiye

Makine Mühendisliği, CAD/CAM Sistemleri, İmalat Süreçleri ve Teknolojileri

Editör Yardımcıları (Yeni)

- Dergi Ana Sayfası
- Hakkında
- Amaç ve Kapsam
- Makale Gönder
- Dergi Kurulları
- İstatistikler
- Yazım Kuralları
- Etik İlkeler ve Yayın Politikası
- Ücret Politikası
- Dizinler
- Arşiv
- İletişim
- Yazar Rehberi
- Dergi Ölçümleri
- Tarandığı Veri Tabanları



Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN
GAZİ ÜNİVERSİTESİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Türkiye

Çok Ölçütlü Karar Verme, Endüstri Mühendisliği, Ergonomi ve İnsan Faktörleri Yönetimi



Prof. Dr. Afşin SARITAŞ
ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Türkiye Web

İnşaat Mühendisliğinde Sayısal Modelleme, Yapı Mühendisliği, Katı Mekanik



Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ
BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ

Türkiye

Karar Desteği ve Grup Destek Sistemleri, Mühendislik, CAD/CAM Sistemleri, Çok Ölçütlü Karar Verme, Endüstri Mühendisliği, Esnek İmalat Sistemleri

Bölüm Editörleri (Yeni)



Prof. Dr. Murat AKSOY
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Türkiye

Elektronik



Prof. Dr. Leyla TANAÇAN
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Türkiye Web

Mimarlık, Mimarlıkta Malzeme ve Teknoloji, Fiziksel Çevre Kontrolü, Yapı Malzemeleri



Doç. Dr. Serdar KOCAMAN
ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Türkiye

Fotonik, Optoelektronik ve Optik İletişim, Fiber Optik Haberleşme Sistemleri ve Teknolojileri

Prof. Dr. Bayram ŞAHİN



İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Türkiye

Akışkan Mekaniği ve Termal Mühendislik, Akışkan Akışı, Isı ve Kütle Transferinde Deneysel Yöntemler, Mikroakışkanlar ve Nanoakışkanlar, Enerji Üretimi, Dönüşüm ve Depolama (Kimyasal ve Elektiksel hariç), Otomotivde Isı Transferi



Prof. Dr. Tolga OVATMAN
ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY FACULTY OF COMPUTER AND INFORMATICS

Türkiye Web

Bulut Bilişim, Paralel ve Dağıtık Sistemler, Bilgisayar Yazılımı



Prof. Dr. Erkan AFACAN
GAZİ UNİVERSİTY, TURKEY

Türkiye Web

Bilgi Güvenliği ve Kriptoloji, Kriptografi, Bilim Felsefesi, Cebir ve Sayı Teorisi, Mühendislik Elektromanyetiği, Elektronik Harp, Kablosuz Haberleşme Sistemleri ve Teknolojileri (Mikro Dalga ve Milimetrik Dalga dahil)



Prof. Dr. Lale T. ERGENE
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Türkiye Web

Elektrik Makineleri ve Sürücüler



Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Türkiye

Prof. Dr. Cengiz KahramanProf. Kahraman, 1965 yılında Üsküdar'da doğdu. 1983 Yılında Kuleli Askeri Lisesi'nden mezun oldu. 1984 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde yükseköğrenimine başladı. 1988 yılında mezun olduğu bu bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. İTÜ'den 1988'de Endüstri Mühendisliği lisans derecesini, 1990'da endüstri mühendisliği yüksek lisans derecesini ve 1996 yılında endüstri mühendisliği doktora derecesini aldı. Prof. Kahraman, ***... Devamını Oku***

Karar Desteği ve Grup Destek Sistemleri, Bulanık Hesaplama, Endüstri Mühendisliği



Prof. Dr. Erkan OTERKUS
UNİVERSİTY OF STRATHCLYDE

Birleşik Krallık

Teorik ve Uygulamalı Mekanik Matematiği, Katı Mekanik, Sayısal Modelleme ve Mekanik

Geri Bildirim

Karakterizasyon



Prof. Dr. Ahmet TÜRK
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
Türkiye

Malzeme Bilimi ve Teknolojileri, Kaynak Teknolojileri, Malzeme Mühendisliği, Döküm Teknolojileri, Kaplama Teknolojisi, Metaller ve Alaşım Malzemeleri



Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ
BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
Türkiye

Karar Desteği ve Grup Destek Sistemleri, Mühendislik, CAD/CAM Sistemleri, Çok Ölçütlü Karar Verme, Endüstri Mühendisliği, Esnek İmalat Sistemleri



Doç. Dr. Ulaş YAMAN
ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Türkiye Web

Makine Mühendisliği



Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN
GAZİ ÜNİVERSİTESİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
Türkiye

Çok Ölçütlü Karar Verme, Endüstri Mühendisliği, Ergonomi ve İnsan Faktörleri Yönetimi



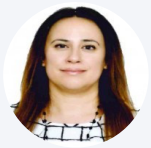
Dr. Besim BARANOĞLU
OSTİM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Türkiye

Sonlu Elemanlar Analizi, Mühendislik, Makine Mühendisliğinde Sayısal Yöntemler, İmalat Süreçleri ve Teknolojileri



Prof. Dr. Müslüm ARICI
KOCAELI UNIVERSITY
Türkiye Web

Akışkan Akışı, Isı ve Kütle Transferinde Hesaplamalı Yöntemler (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Dahil)



Doç. Dr. Ayşegül TERECİ
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
Türkiye

Mimari ve Tasarım, Mimari Bilim ve Teknoloji, Sürdürülebilir Mimari, Mimarlık ve Çevre Psikolojisi



Prof. Dr. Hüseyin DELİGÖZ
ISTANBUL UNİVERSİTY-CERRAHPASA
Türkiye

Enerji, Kimya Mühendisliği, Ayırma İşlemleri, Malzeme Bilimi ve Teknolojileri, Polimer Bilimi ve Teknolojileri



Prof. Dr. M. Ali AKCAYOL
GAZI UNIVERSITY, FACULTY OF ENGINEERING, DEPARTMENT OF COMPUTER ENGINEERING
Türkiye Web

Derin Öğrenme, Büyük Veri



Doç. Dr. Mehmet Serdar GÜZEL
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
Türkiye

Prof. Dr. Mehmet Serdar Güzel, Ankara Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde akademisyen olup, yapay zeka ve sağlık bilişimi alanlarında çalışmalar yürütmektedir.

Bilgi ve Bilgi İşleme Bilimleri, Yapay Zeka, Mekatronik Mühendisliği



Doç. Dr. Mert ANKARALI
ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Türkiye

Sinirbilim, Biyolojik Kontrol, Kontrol Teorisi ve Uygulamaları, Kontrol Mühendisliği, Mekatronik Mühendisliği, Saha Robotiği, Tıbbi Robotik, Biyomekanik



Prof. Dr. Ali AKPEK
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Türkiye

Biyofabrikasyon, Biyomedikal Bilimler ve Teknolojiler, Biyomedikal Enstrümantasyon, Doku Mühendisliği



Prof. Dr. Ali Tolga BOZDANA
GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
Türkiye

Malzeme Tasarım ve Davranışları, Metaller ve Alaşım Malzemeleri , İmalat Süreçleri ve Teknolojileri



Prof. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN
GAZİ ÜNİVERSİTESİ - ANKARA
Türkiye

Mühendislik, Üretimde Optimizasyon



Prof. Dr. Bülent AKBAŞ
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
Türkiye Web

İnşaat Mühendisliği



Prof. Dr. Hüseyin KURT
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE MİMARLIK FAKÜLTESİ
Türkiye

Akışkan Mekaniği ve Termal Mühendislik, Enerji Üretimi, Dönüşüm ve Depolama (Kimyasal ve Elektiksel hariç), Otomotivde Isı Transferi



Doç. Dr. Dilşad Dolunay ESLEK KOYUNCU
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Türkiye Web

Doç. Dr. Dilşad Dolunay ESLEK KOYUNCU, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde Lisans eğitimini tamamlayarak 2005 yılında mezun olmuştur. Gazi

Son Güncelleme Zamanı: **25.02.2025 16:18:10**

General Inform...
Web of Science ...
Journal Citatio...
Peer Review Inf...

Return to Search Results

JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE OF GAZI UNIVERSITY

Share This Journal

ISSN / eISSN **1300-1884 / 1304-4915**
Publisher **GAZI UNIV, FAC ENGINEERING ARCHITECTURE, BAYAR BULVARI, MALTEPE, ANKARA, Turkiye, 06570**

General Information

Journal Website	Visit Site	**Publisher Website**	Visit Site
1st Year Published	1986	**Frequency**	Quarterly
Issues Per Year	4	**Country / Region**	TURKIYE
Primary Language	Turkish		

Web of Science Coverage

Collection	Index	Category	Similar Journals
Core Collection	Science Citation Index Expanded (SCIE)	Engineering, Multidisciplinary	Find Similar Journals
Other	Essential Science Indicators	Engineering	Find Similar Journals

Search a topic within this journal

Search a topic within this journal...

Search

Journal Citation Report™ (JCR)

Journal Citation Repor

Journal Impact Factor™ (JIF)

JCR SUBSCRIPTION ACTIVE

Downloaded on 10.03.2025 11:21:20

2023 Journal Performance Data for: Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

ISSN
1300-1884

EISSN
1304-4915

JCR ABBREVIATION
J FAC ENG ARCHIT GAZ

ISO ABBREVIATION
J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.

Journal Information

EDITION
Science Citation Index Expanded (SCIE)

CATEGORY
ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY

LANGUAGES
Turkish

REGION
TURKIYE

1ST ELECTRONIC JCR YEAR
2010

Publisher Information

PUBLISHER
GAZI UNIV, FAC ENGINEERING ARCHITECTURE

ADDRESS
BAYAR BULVARI, MALTEPE, ANKARA 06570, Turkiye

PUBLICATION FREQUENCY
4 issues/year

 © 2025 Clarivate

Rank by Journal Impact factor

Journals within a category are sorted in descending order by Journal Impact Factor (JIF) resulting in the Category Ranking below. A separate rank is shown for each category in which the journal is listed in JCR. Beginning in 2023, ranks are calculated by category. Learn more

CATEGORY

ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY

105/181

JCR YEAR	JIF RANK	QUARTILE	JIF PERCENTILE
2023	105/181	Q3	42.3

Rank by JIF before 2023 for ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY

EDITION

Science Citation Index Expanded (SCIE)

JCR YEAR	JIF RANK	QUARTILE	JIF PERCENTILE
2022	75/90	Q4	17.2
2021	80/92	Q4	13.59
2020	75/90	Q4	17.22
2019	79/91	Q4	13.74
2018	76/88	Q4	14.20
2017	61/86	Q3	29.65
2016	77/85	Q4	10.00
2015	85/85	Q4	0.59
2014	78/85	Q4	8.82
2013	78/87	Q4	10.92
2012	83/90	Q4	8.33
2011	87/90	Q4	3.89
2010	77/87	Q4	12.07

 © 2025 Clarivate

Rank by Journal Citation Indicator (JCI)

Journals within a category are sorted in descending order by Journal Citation Indicator (JCI) resulting in the Category Ranking below. A separate rank is shown for each category in which the journal is listed in JCR. Data for the most recent year is presented at the top of the list, with other years shown in reverse chronological order.Learn more

CATEGORY

ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY

102/182

JCR YEAR	JCI RANK	QUARTILE	JCI PERCENTILE
2023	102/182	Q3	44.23
2022	97/178	Q3	45.79
2021	97/175	Q3	44.86
2020	91/170	Q3	46.76
2019	93/169	Q3	45.27
2018	77/168	Q2	54.46
2017	71/168	Q2	58.04

 © 2025 Clarivate

Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

13B 23B 3

Cilt: 39 Sayı: 4, 20.05.2024

YIL: 2024

Makaleler

Araştırma Makalesi

1. Analiz araçları yardımıyla sürdürülebilir bisiklet yolları seçimi üzerine bir çalışma

Şükran Yemişçioğlu *, Tülay Çivici , Yusuf Yıldız

Sayfa : 2011-2022 PDF

Araştırma Makalesi

2. Ortak vektör yöntemiyle bağırsak sesinin tespiti ve sınıflandırılması

Halil Güvenç *

Sayfa : 2023-2030 PDF

Araştırma Makalesi

3. Havayolu bozulma yönetiminde gecikme tahmini için makine öğrenmesi algoritmaları ile sınıflandırma

Nevra Yaman *, Ediz Atmaca

Sayfa : 2031-2040 PDF

Araştırma Makalesi

4. Performans ve sürülebilirlik ölçütlerini sağlamak için motor kontrol ünitesinin çevrimiçi optimizasyonu

Özer Ulucay *, Selim Sivrioğlu , Muammer Özkan

Sayfa : 2041-2056 PDF

Araştırma Makalesi

5. S-çekirdekli sandviç panel kompozitin üç nokta eğme davranışları: Sonlu eleman modelleme ve deneysel incelemesi

Hasan Murat Öztemiz *, Şemsettin Temiz

Sayfa : 2057-2076 PDF

Araştırma Makalesi

- Arşiv
  - Cilt: 39 Sayı: 2, 30.11.2023
  - Cilt: 39 Sayı: 3, 20.05.2024
  - Cilt: 39 Sayı: 4, 20.05.2024
  - Cilt: 40 Sayı: 1, 16.08.2024
  - Cilt: 40 Sayı: 2, 3.02.2025

6. Türkiye için hayvansal atık yağlarından biyodizel üretiminin tekno-ekonomik analizi ve çevresel etkilerinin hesaplanması

Fatıma Büşra Aslan , Kırali Murtezaoğlu , Mehmet Melikoğlu *

Sayfa : 2077-2090 PDF

Araştırma Makalesi

7. Alümina önyüzlü polietilen destekli kompozit zırhın balistik davranışlarının deneysel incelenmesi

Mehmet Akif Akdoğan *, Selim Türkbas

Sayfa : 2091-2102 PDF

Araştırma Makalesi

8. Güneş enerjisi kaynaklı absorbsiyonlu soğutma sistemlerinin SF analizi

Ali Haydar Gündüz , Canan Cimsit *

Sayfa : 2103-2112 PDF

Araştırma Makalesi

9. Scrum çerçevesi uygulayan takımlarda üretim, hedef ve performans ilişkisine bağlı olarak takımların sınıflandırılması

Erkan Sarıkaya , Samet Gürsev *

Sayfa : 2113-2124 PDF

Araştırma Makalesi

10. Seru üretim sistemi ile montaj hattı üretim sisteminin farklı işgücü yetkinlik seviyelerinde istatistiksel olarak karşılaştırılması

Emre Bilgin Sarı , Şebnem Demirkol Akyol *

Sayfa : 2125-2142 PDF

Araştırma Makalesi

11. EEG sinyallerinin Banach uzayında Graf-Kuramsal bağlantı değişmezlik ölçütleri

Rüştü Murat Demirer *, Beyhan Kıran

Sayfa : 2143-2154 PDF

Araştırma Makalesi

12. Güneş ışınımı tahmini için CNN-LSTM modeli: Performans analizi

Ardan Hüseyin Eşlik *, Ozan Sen , Fatih Serttaş

Sayfa : 2155-2162 PDF

Araştırma Makalesi

13. PMMA/PLA/Kil biyobozunur nanokompozit sentezi ve karakterizasyonu

Tuba Uzunoğlu , Ayla Altınten *

Sayfa : 2163-2176 PDF

Araştırma Makalesi

14. Görme engelliler için nesne tanıma ve resim altyazısını derin öğrenme teknikleriyle entegre eden verimli bir aktivite tanıma modeli

Zeynep Hilal Kilimci *, Ayhan Küçükmanisa

Sayfa : 2177-2186 PDF

Araştırma Makalesi

15. T5 ve T6 ısıl işlemlerinin Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerinin incelenmesi

Ali Paşa Hekimoğlu *, Murat Hacıosmanoğlu , Murat Tellioğlu , Temel Savaşkan

Sayfa : 2187-2196 PDF

Araştırma Makalesi

16. İnsan - endüstriyel mobil robot etkileşiminde güvenlik önlemlerinin boyutlandırılması için nesne tespit modeli geliştirme

Tarık Aslan *, Mustafa Yagımlı

Sayfa : 2197-2208 PDF

Araştırma Makalesi

17. Büyük girdap benzetimi analizleri için gerekli ağ çözünürlüğü üzerine bir çalışma

Kürşad Melih Güleren *

Sayfa : 2209-2222 PDF

Araştırma Makalesi

18. Bütünleşik sipariş gruplama ve zaman pencereli araç rotalama problemi

Esra Boz *, Nil Aras

Sayfa : 2223-2238 PDF

Araştırma Makalesi

19. Doğal puzolan-esaslı jeopolimer üretiminde mikrodalga kürünün rolü

Kübra Ekiz Barış *

Sayfa : 2239-2252 PDF

Araştırma Makalesi

20. Enine ışıyan düzlemsel ayrık frekanslı dizi antenlerde örüntü düzeltmede yeni bir yöntem

Muhammed Eyyub Günay , İhsan Kanbaz * , Ertugrul Aksoy

Sayfa : 2253-2262 PDF

Araştırma Makalesi

21. Karaciğer enzimlerinden hastalık tahmini için yapay sinir ağları ve sezgisel yöntem modellerinin performansları: Biyokimya cihazı çıktılarına uygulanması

Seyit Hamza Çavga *

Sayfa : 2263-2270 PDF

Araştırma Makalesi

22. Akışla dövme GOV ve aşındırıcı macunla işleme AMİ proseslerinin Ti-6Al-4V havacılık malzemesinde deneysel kıyaslanması

Kürşad Göv * , Murat Kalak

Sayfa : 2271-2288 PDF

Araştırma Makalesi

23. Parçacık sürü optimizasyonu temelli ultra hızlı yenilenebilir enerji kaynağı optimizasyon aracı tasarımı

Cemil Altın *

Sayfa : 2289-2304 PDF

Araştırma Makalesi

24. Mobil haritalama amaçlı Mobilenet tabanlı trafik işaretleri tespit sistemi: kitlesel coğrafi bilgi toplama sistemi

Ceren Özcan Tatar * , Emrah Yılmaz , Abdullah Efe , Berk Sönmez , Yalçın Özdemir , Burak Danışan , Hale İrem Beyaz , Engin Yegnidemir

Sayfa : 2305-2315 PDF

Araştırma Makalesi

25. Radyosonde rasatları ile makine öğrenmesi tabanlı hava durumu kestirimi

Eralp Gogen * , Selda Güney

Sayfa : 2317-2328 PDF

Araştırma Makalesi

26. Hava alıklı elektro-pnömatik kontrol tahrik sisteminin açık çevrim performansının incelenmesi

Orhan Fatih Ercis *, Ömer Keleş

Sayfa : 2329-2342 PDF

Araştırma Makalesi

27. Türkiye yangın yönetmeliğine göre toplanma amaçlı yapıların tahliye performansının simülasyon tabanlı analiz edilmesi

Muhsin Selçuk Satır *, Abdurrahman Yağmur Topraklı

Sayfa : 2343-2352 PDF

Araştırma Makalesi

28. Difüzyon yolu ile moleküler haberleşme modelinin birikimli dağılım fonksiyonları ile analizi

İbrahim Işık *, Esme Işık , Abdullah Ateş

Sayfa : 2353-2362 PDF

Araştırma Makalesi

29. Kitosan parçacıklarının üretimi için düşük maliyetli mikrosistemlerin tasarımı ve fabrikasyonu

Şeref Akay *, Hasret Özdilek

Sayfa : 2363-2372 PDF

Araştırma Makalesi

30. FUZZY FUCOM yöntemi kullanarak itfaiye istasyonu yer seçiminin incelenmesi

Gül Uslu *, Babek Erdebilli

Sayfa : 2373-2382 PDF

Araştırma Makalesi

31. Nötron radyasyondan korunmak için bor katkılı yüzey kaplaması oluşturulması ve karakterizasyonu

Hakan Seval *, Mustafa Yağımlı , Hakan Tozan

Sayfa : 2383-2394 PDF

Araştırma Makalesi

32. Yapıların cam alanlarının enerji etkin iyileştirilmesi ve FDM uygulamasının enerji performansına etkisinin değerlendirilmesi: İstanbul ve Diyarbakır örnekleri

Hasan Tunay Cengiz *, Gülay Zorer Gedik , Ezgi Korkmaz

Sayfa : 2395-2408 PDF

Araştırma Makalesi

33. Elektronik kart üretiminde hat atama problemi için süreç akışını dikkate alan bütünleşik bir yaklaşım

Ömer Faruk Ünal , Şeyda Serdarasan *

Sayfa : 2409-2422 PDF

Araştırma Makalesi

34. Başlangıç oksitlerinin tane boyutunun Zn2SnO4 sentezi ve sinterlenmesi üzerine etkisinin belirlenmesi

Sadiye Erden *, Emel Ozel , Ender Suvacı

Sayfa : 2423-2434 PDF

Araştırma Makalesi

35. Veri Zarflama Analizinde istenmeyen girdi/çıktıya sahip tüm birimler için çevresel etkinlik değerlendirilmesine yeni bir model önerisi

Melike Kübra Ekiz Bozdemir , Selen Avcı , Gulsen Akman *

Sayfa : 2435-2446 PDF

Araştırma Makalesi

36. Yerel olmayan elastisite teorisine göre üç mesnetli nano kirişin doğrusal olmayan titreşim davranışı

Burak Emre Yapanmış *, Süleyman Murat Bağdatlı , Necla Toğun

Sayfa : 2447-2462 PDF

Araştırma Makalesi

37. Kitosan/modifiye montmorillonit küreler ile asit Violet 90 boyarmaddesinin adsorpsiyonu

Müjgan Okur *, Berkay Taşkıntuna

Sayfa : 2463-2472 PDF

Araştırma Makalesi

38. Bilgisayarlı görü ve makine öğrenmesi ile ergonomik risk değerlendirme uygulaması

Alper Kiraz *, Anıl Özkan Geçici

Sayfa : 2473-2484 PDF

Araştırma Makalesi

39. Ön eğitimli Bert modeli ile patent sınıflandırılması

Selen Yücesoy Kahraman *, Alptekin Durmuşoğlu , Türkay Dereli

Sayfa : 2484-2496 PDF

Araştırma Makalesi

40. Sürdürülebilir bina yenilemeye ilişkin maliyet etkin tasarım karar modeli

Seda Serbest Yenidünya *, Sevgül Limoncu

Sayfa : 2497-2514 PDF

Araştırma Makalesi

41. Geleneksel sinterleme ve spark plazma sinterleme yöntemlerinin nanokristal yapılı CoCrFeNi yüksek entropili alaşımın mikroyapısal özellikleri ve sertliği üzerine etkilerinin araştırılması

Ali Rıza Baloğlu , Mustafa Tekin *, Hasan Kotan

Sayfa : 2515-2524 PDF

Araştırma Makalesi

42. Son sınıf mimarlık öğrencilerinde öğrenme süreçleri kişilik ve motivasyon arasındaki ilişki

Gökçe Ketizmen *

Sayfa : 2525-2538 PDF

Araştırma Makalesi

43. Türkiye'nin toplam sağlık harcaması tahmini için trend-artık ayrıştırması temelli bir modelleme yaklaşımı

Rezzan Yardımcı , Eşref Boğar *

Sayfa : 2539-2550 PDF

Araştırma Makalesi

44. İnsansı robot robotis-op2 için itme kurtarma kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması

Emrah Aslan *, Muhammet Ali Arserim , Ayşegül Uçar

Sayfa : 2551-2566 PDF

Araştırma Makalesi

45. Doktor nöbet cetveli çizelgeleme problemi için ağırlıklı hedef programlama tabanlı genetik algoritma

Anıl Yalçın *, Derya Deliktaş

Sayfa : 2567-2586 PDF

Araştırma Makalesi

46. Elektrikli araç batarya modülünün su ile soğutulmasının temassızlık direnci dikkate alınarak incelenmesi

Kağan Peneklioğlu , Kemal Bilen *

Sayfa : 2587-2600 PDF

Araştırma Makalesi

47. Bir dişli çiftinde kapsamlı bir yük dağıtım algoritması oluşturulması ve dinamik tepki üzerindeki etkisi

Süleyman Emre Civan * , Cihan Demir

Sayfa : 2601-2616 PDF

Araştırma Makalesi

48. İçerisinden direk hava akışı metoduyla soğuyabilen takılabilir modüllerde kanatçık yükseklik etkisinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi

Yusuf Tekin , Muhittin Bilgili *

Sayfa : 2617-2630 PDF

Araştırma Makalesi

49. Yarasa algoritması ile optimize edilmiş GBM modeli kullanarak mevsim bazlı bisiklet kiralama sayılarının tahmini

Kadir İleri *

Sayfa : 2631-2642 PDF

Derleme

50. Kimyasal metalurjide çevreci bir yaklaşım: Solvometalurji

Çisem Çelik Kurtulan , Şevki Samet Kaplan , Elif Güloğlu , Gökhan Orhan , Sebahattin Gürmen , Mehmet Şeref Sönmez *

Sayfa : 2643-2654 PDF

Amaç ve Kapsam +

Yazım Kuralları +

Etik İlkeler ve Yayın Politikası +

Ücret Politikası +