UÇUCU KÜL BAZLI, ISI İLE KÜR EDİLMİŞ GEOPOLİMER BETONUN EĞİLME MUKAVEMETİ VE DİNAMİK MODÜL İLİŞKİSİNİN HASARSIZ DENEYSEL MODAL ANALİZ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

ASSESSING FLY ASH-BASED, HEAT-CURED GEOPOLYMER CONCRETE'S FLEXURAL STRENGTH AND DYNAMIC MODULUS RELATIONSHIP WITH NON-DESTRUCTIVE EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS

Öğ. Gör. Dr. Ferhat ÇEÇEN

Süleyman Demirel Üniversitesi,

Göller Bölgesi Teknokent Koordinatörlüğü, Çünür, Isparta.

cecenferhat@sdu.edu.tr, +905072314877

Dr. Öğ. Üy. Ahmet ÖZBAYRAK

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Talas, Kayseri.

ozbayrak@erciyes.edu.tr, +903522076666/32401

Prof. Dr. Bekir AKTAŞ

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Talas, Kayseri.

baktas@erciyes.edu.tr, +903522076666/32415

ÖZET

Seramik benzeri özelliklere sahip bir malzeme olan geopolimer beton, geleneksel çimento bazlı betona sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Geopolimer beton üretiminde temel olarak uçucu kül veya cüruf gibi endüstriyel yan ürünler kullanıldığından, bu beton, geleneksel üretime kıyasla daha düşük bir karbon ayak izi bırakmaktadır. Uygun şekilde tasarlanmış geopolimer beton, basınç ve çekme dayanımı ile refrakterliği açısından, geleneksel betondan daha üstün sonuçlar verebilmektedir. Her ne kadar bu avantajlar, seramiklerle karşılaştırıldığında daha sınırlı kalsa da, önemli ölçüde daha düşük üretim maliyetleri, daha az karbon emisyonu ve daha fazla esneklik sunmakta, bu da onu dinamik yüklere maruz kalan büyük hacimli altyapı projeleri için ideal hale getirmektedir. Literatürde, geopolimer betonun çekme dayanımı ile dinamik elastisite modülü arasındaki ilişki konusunda, özellikle hasarsız yöntemlerle dinamik özelliklerinin değerlendirilmesine yönelik sınırlı araştırma bulunmaktadır. Oysaki bu özellikler, dinamik yüklere karşı dayanıklılık açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, uçucu kül bazlı ve ısı ile kür edilmiş geopolimer betonun eğilme mukavemeti ile dinamik özellikleri arasında güvenilir nümerik ilişkiler kurmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, sodyum silikat ve sodyum hidroksit dozajlarının farklı olduğu altı farklı karışım oranı ile üretilen numuneler çeşitli test ve analizlere tabi tutulmuştur. Dinamik özellikler, hasarsız deneysel modal analiz ve sonlu elemanlar geri analiz yöntemi ile değerlendirildikten sonra, eğilme mukavemetleri dört noktalı eğilme testi ile belirlenmiştir. Sonuçlar, eğilme mukavemetlerinin 3.71 ila 5.97 MPa, temel düşey rezonans frekanslarının 802.3 ila 866.8 Hz ve dinamik modüllerin 25.2 ila 31.0 GPa arasında değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, eğilme mukavemeti ve dinamik modül ile rezonans frekansları arasında güçlü korelasyonlar ($R^2 > 0.97$) bulunmuştur. Bu bulgular, deneysel modal analiz yönteminin, geopolimer betonun kritik mekanik özelliklerini değerlendirmek için güvenilir ve hasarsız bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Geopolimer beton, eğilme mukavemeti, dinamik modül, deneysel modal analiz.

ABSTRACT

Geopolymer concrete, a material with ceramic-like properties, offers a sustainable and environmentally friendly alternative to traditional cement-based concrete. Since geopolymer concrete production primarily uses industrial by-products such as fly ash or slag, it leaves a significantly lower carbon footprint compared to traditional concrete production. Properly designed geopolymer concrete can yield superior results in terms of compressive and tensile strength, as well as refractoriness, when compared to conventional concrete. Although these advantages may be somewhat limited when compared to ceramics, it offers significantly lower production costs, reduced carbon emissions, and greater flexibility, making it ideal for large-scale infrastructure projects exposed to dynamic loads. In the literature, there is limited research on the relationship between the tensile strength and the dynamic elastic modulus of geopolymer concrete, especially regarding the evaluation of its dynamic properties using non-destructive methods. However, these properties are critical for resilience under dynamic loads. This study aims to establish reliable numerical relationships between the flexural strength and dynamic properties of fly ash-based, heat-cured geopolymer concrete. In the study, samples produced with six different mix ratios, varying in sodium silicate and sodium hydroxide dosages, were subjected to various tests and analyses. After the dynamic properties were evaluated using non-destructive experimental modal analysis and finite element back-analysis methods, the flexural strengths were determined using a four-point bending test. The results showed that the flexural strengths ranged from 3.71 to 5.97 MPa, the fundamental vertical resonance frequencies ranged from 802.3 to 866.8 Hz, and the dynamic moduli ranged from 25.2 to 31.0 GPa. Additionally, strong correlations ($R^2 > 0.97$) were found between resonance frequencies and both dynamic modulus and flexural strength. These findings confirm that experimental modal analysis is a reliable and non-destructive method for evaluating the critical mechanical properties of geopolymer concrete.

Keywords: Geopolymer concrete; Flexural strength; Dynamic modulus; Experimental Modal Analysis.

GİRİŞ

İnşaat sektöründe günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri betondur. Özellikle çimento esaslı beton, sektörde büyük bir pazar payına sahiptir [1]. Bununla birlikte, son yıllarda geopolimer beton, sürdürülebilir bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Geopolimer betonun bu yaygınlaşmasında, düşük karbon ayak izi, yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı ile elektriksel yalıtkanlık gibi üstün özellikleri etkili olmaktadır [2, 3].

Geopolimer betonun yapısal özellikleri ile seramikler arasında bazı benzerlikler de mevcuttur. Seramik malzemeler genellikle inorganik, kristal veya amorf yapıda; oksitler, karbürler, nitrürler ve silikatlar gibi bileşiklerden oluşmaktadır [4]. Geopolimer beton da alüminosilikat bazlı bir malzemedir ve yarı amorf-yarı kristal bir yapıya sahiptir [1]. Bu benzerlik, geopolimer betonu, kimyasal yapısı açısından seramik malzemelere yakınlaştırmaktadır. Bu yüzden geopolimer beton, bazı kaynaklarda seramik-benzeri malzeme (seramic-like material), hidro-seramik (hydroceramic) veya alkali-bağlı seramik (alkali-bonded ceramic) olarak adlandırılmaktadır [5-8]. Ancak seramikler genellikle maliyet ve emisyon artışına neden olan çok yüksek sıcaklıklarda (1200-1600°C) sinterlenirken, geopolimer beton nispeten çok daha düşük sıcaklıklarda (<90°C) kimyasal reaksiyonlarla sertleşmektedir [9]. Bu yüzden, üretim maliyeti ve karbon ayak izi seramiklere nispeten çok daha düşük kalmaktadır.

Geopolimer betonun diğer önemli avantajları, dinamik performansı ve esnekliğidir. İnşaat sektöründe çoğu yapı, dinamik yüklere maruz kaldığından, yapı malzemelerinin dinamik özellikleri de statik kapasiteleri kadar önemli olmaktadır [1]. Yapılan deneysel modal analizler ve basınç dayanımı testleri göstermektedir ki, uygun bir şekilde dizayn edilen geopolimer betonun hem statik hem de dinamik performansı, çimento esaslı betondan daha üstün sonuçlanabilmektedir [1, 10]. Tüm bu özellikler, geopolimer betonu yüksek performans gerektiren inşaat projeleri için sürdürülebilir bir alternatif haline getirmektedir [9]. Ayrıca kırılgan yapıya sahip bazı seramiklere karşı da, ekonomik ve çevreci bir alternatif olma potansiyeli söz konusudur.

Literatürde geopolimer betonun basınç dayanımı ve dinamik özellikleri arasındaki ilişki konusunda az sayıda olsa da bazı çalışmalar mevcuttur [1, 10]. Ancak çekme dayanımı ve dinamik elastisite

modülünün rezonans frekansı ile ilişkisini araştıran çalışmalar yetersizdir. Bu çalışmada, literatürdeki bu eksiklik göz önünde bulundurularak, uçucu kül bazlı, ısı ile kür edilen çeşitli geopolimer beton numunelerinin dinamik özellikleri, deneysel modal analiz ve sonlu elemanlar geri-analiz yöntemi ile değerlendirilmiş, bunun akabinde, eğilme mukavemetleri dört noktalı eğilme testi ile belirlenmiştir. Sonuçta ulaşılan değerler arasında nümerik ilişkiler araştırılmış ve bu ilişkileri ortaya koyan güvenilir modeller oluşturulmuştur.

YÖNTEM

Bu çalışmada gepolimer beton üretiminde uçucu kül kullanılmış olup, Türkiye'deki Adana Sugözü İsken Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Geopolimer beton numunelerinin üretiminde, nehir kumu (0/4 mm), iri bazalt agregası (7/14 mm), modül oranı 2.06 olan sodyum silikat (SS) ve 14-M sodyum hidroksit (SH) kullanılmıştır. Gepolimer beton üretildikten sonra 150x150x750 mm'lik prizma kalıplara dökülmüş ve 90°C'de 24 saat kürlenmiştir. Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 28 gün oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu çalışmada altı (6) farklı geopolimer beton karışımının analizlerleri gerçekleştirilmiş olup, karışım oranları ve üretim süreçleri ile ilgili diğer detaylar, yazarların önceki bir çalışmasında sunulmuştur [1]. Üretilen bazı geopolimer beton prizma numuneleri Şekil 1'de görülmektedir. Bu numuneler önce deneysel modal testlere, ardından eğilme dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Prizmaların eğilme dayanımlarını belirlemek için Şekil 2'de görüldüğü üzere, her karışımdan üç prizma numunesi ASTM C78'e uygun olarak dört noktalı eğilme yöntemiyle test edilmiş olup, test süreci ile ilgili diğer detaylar yazarların önceki bir çalışmasında sunulmuştur [11].

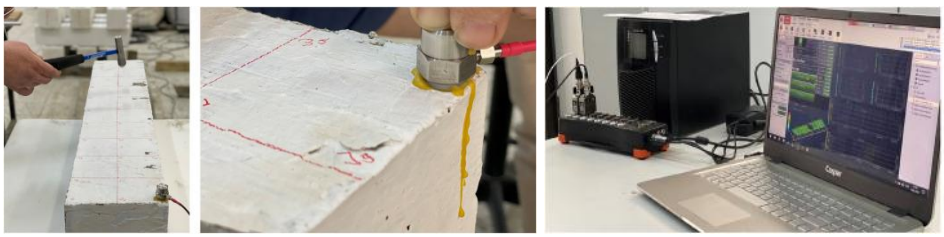


Şekil 1. Çalışmada kullanılan 150x150x750 mm prizma geopolimer beton numuneleri örnekleri [1]



Şekil 2. 150x150x750 mm'lik numunelerin dört noktalı eğilme testlerine dair örnek görseller [11]

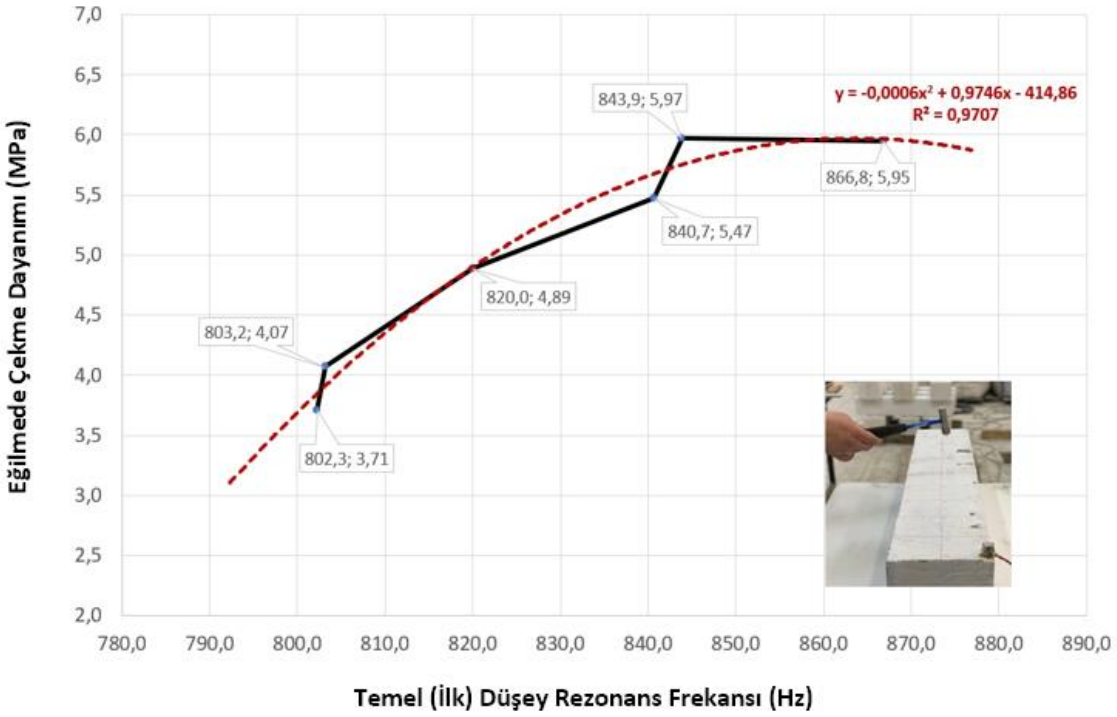
Bu çalışmada kullanılan modal test düzeneği Şekil 3'te görülmektedir [10]. Testler esnasında numuneler, serbest salınım yapabilmesi amacıyla 600 mm kalınlığında ve 70 kg/m^3 yoğunluğunda poliüretan bloklar üzerine yerleştirilmiştir. Test numuneleri, yüksek çözünürlüklü analizler için eşit uzaklıkta 33 noktaya bölünmüş ve her bir nokta, modal çekiçle 5'er kez uyarılarak etki (kuvvet) ve yanıt (ivme) değerleri ölçülmüştür. Elde edilen bu veriler modal analiz tekniklerine uygun şekilde oranlanarak Frekans Yanıt Fonksiyonları (FRF) elde edilmiştir. Bu FRF grafikleri ile rezonans frekansları belirlenmiştir. Ayrıca, numunelerin rezonans frekansları ve birim hacim ağırlıkları girdileri (input) kullanılarak sonlu eleman geri-analiz tekniğiyle (back-analysis) dinamik elastisite modülleri belirlenmiştir. Test ve analiz süreçleri hakkındaki diğer detaylar yazarların önceki çalışmalarında mevcuttur [1, 10].



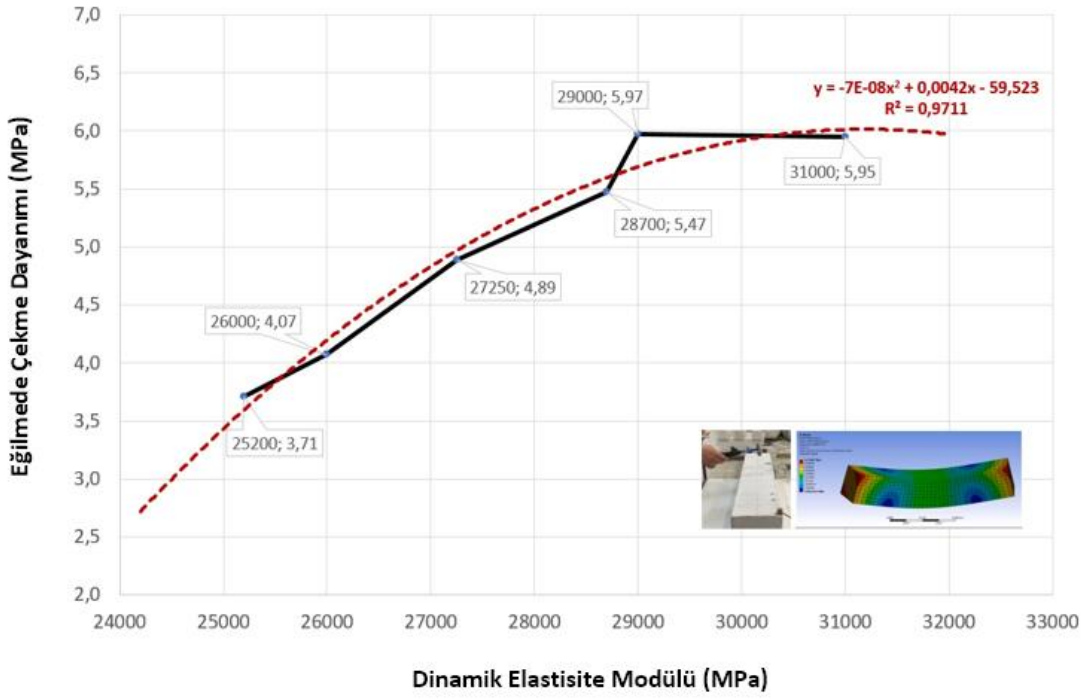
Şekil 3. Deneysel modal test ve analiz sürecine dair örnek görseller [10]

BULGULAR

Bu çalışmada analiz edilen 6 geopolimer beton numunesinin eğilmede çekme dayanımı (MPa) ile temel rezonans frekansları (Hz) arasındaki ilişki Şekil 4'te, eğilmede çekme dayanımı (MPa) ile dinamik elastisite modülü arasındaki ilişki ise Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Çalışma kapsamında analiz edilen 6 farklı geopolimer beton numunesinin eğilmede çekme dayanımı (MPa) ile temel (ilk) rezonans frekansı (Hz) arasındaki ilişkiyi gösterir grafik



Şekil 5. Çalışma kapsamında analiz edilen 6 farklı geopolimer beton numunesinin eğilmede çekme dayanımı (MPa) ile dinamik eleastisite modülü arasındaki ilişkiyi gösterir grafik

TARTIŞMA VE SONUÇ

Geopolimer beton, düşük karbon ayak izi ve yüksek performansıyla çimento esaslı konvansiyonel betona sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Uygun şekilde tasarlandığında, dinamik özellikleri çimento esaslı betondan daha üstün olabilen bu malzeme, kimyasal yapısı sayesinde seramiklere benzer özellikler gösterebilmektedir. Ayrıca, seramiklere kıyasla çok daha düşük sıcaklıklarda dayanım kazanmakta ve dinamik olarak kırılgan, yüksek maliyetli ve yüksek karbon ayak izine sahip bazı seramiklere karşı ekonomik ve çevreci bir alternatif olma potansiyeli taşımaktadır.

Bu çalışmada, karışım oranları değişken altı farklı geopolimer beton numunesi üzerinde, tahribatlı ve tahribatsız, çeşitli test ve analizler yürütülmüştür. Bu kapsamda, numunelerin dinamik özellikleri, tahribatsız (non-destructive) deneysel modal analiz ve sonlu elemanlar geri analiz yöntemi ile belirlenirken, eğilme mukavemetleri dört noktalı eğilme testi (tahribatlı, destructive) ile tespit edilmiştir.

Elde edilen test ve analiz sonuçları incelendiğinde, eğilme mukavemetlerinin 3.71 ila 5.97 MPa, rezonans frekanslarının 802.3 ila 866.8 Hz ve dinamik modüllerin 25.2 ila 31.0 GPa arasında değiştiği görülmüştür. Sonuçlar arasındaki ilişki irdelendiğinde ise geopolimer beton numunelerin çekme dayanımları ve dinamik elastisite modülleri ile rezonans frekansları arasında güçlü korelasyonlar bulunduğu belirlenmiştir ($R^2 > 0.97$).

Çalışma sonucunda ulaşılan bir diğer önemli bulgu, deneysel modal analizin geopolymer betonun eğilme muakavemeti ve dinamik elastisite modülü gibi kritik mekanik özelliklerini değerlendirmek için güvenilir ve tahribatsız (non-destructive) bir yöntem olmasıdır. Bu metot sayesinde, numunelerin rezonans frekansları ölçülerek, kısa sürede ve tahribatsız bir şekilde çekme dayanımı ve dinamik elastisite modülüne ulaşılabileceği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] F. Çeçen, A. Özbayrak, B. Aktaş. 2024. "Simultaneously Enhancing the Dynamic Damping and Static Strength Capabilities of Structures: A Case Study Conducted on Fly Ash-based Geopolymer Concrete Specimens using Modal, Mechanical and Microstructural Investigations," Fırat University Journal of Engineering Science, vol. 36 (2), pp. 883-901. Doi: https://doi.org/10.35234/fumbd.1480600

[2] Y. H. M. Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, M. El-Zeadani. 2020. "Clean production and properties of geopolymer concrete; A review," Journal of Cleaner Production, vol. 251, ID: 119679, Doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679

[3] D. Bondar. 2013. "Geo-polymer concrete as a new type of sustainable construction materials," Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Japan, Available [Accessed 22.10.2024]: https://www.researchgate.net/publication/263052696_Geopolymer_Concrete_as_a_New_Type_of_Sustainable_Construction_Materials

[4] K. K. Chawla. 2003. "Ceramic Matrix Materials." Ceramic Matrix Composites. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1029-1_2

[5] J. Davidovits. 2017. "Geopolymers: Ceramic-Like Inorganic Polymers," J. Ceram. Sci. Technol., vol. 08 (3), pp. 335-350. Doi: https://doi.org/10.4416/JCST2017-00038

[6] R. Ahmad, M.M.A. Abdullah, K. Hussin, W.M.W. Ibrahim. 2021. "Fabrication of Lightweight Ceramic Materials Using Geopolymer Technology," Lecture Notes in Civil Engineering, vol 129. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4918-6_9

[7] E. M. Shcherban', A. N. Beskopylny, S. A. Stel'makh, L. R. Mailyan, B. Meskhi, A. A. Shilov, E. Pimenova, D. El'shaeva. 2023. "Combined Effect of Ceramic Waste Powder Additives and PVA on the Structure and Properties of Geopolymer Concrete Used for Finishing Facades of Buildings," Materials, vol. 16, ID: 3259. Doi: https://doi.org/10.3390/ma16083259

[8] S. Singh, S. K. Sharma, M. A. Akbar. 2022. “Developing zero carbon emission pavements with geopolymer concrete: A comprehensive review,” Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 110, ID: 103436, Doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103436

[9] N. B. Mustapa, R. Ahmad, W. M. W. Ibrahim, M.M.A.B. Abdullah, N. Wattanasakulpong, O. Nemeş, A.V. Sandu, P. Vizureanu, I.G. Sandu, C.W. Kartikowati. 2023. “Effect of Sintering Mechanism towards Crystallization of Geopolymer Ceramic—A Review.” Materials, vol. 16, ID: 4103. Doi: https://doi.org/10.3390/ma16114103

[10] F. Çeçen, A. Özbayrak, B. Aktaş. 2023. “Experimental modal analysis of fly ash-based geopolymer concrete specimens via modal circles, mode indication functions, and mode shape animations,” Cement and Concrete Composites, vol. 137, ID: 104951. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104951

[11] A. Özbayrak, H. Kucukgoncu, H. H. Aslanbay, Y. G. Aslanbay, O. Atas. 2023. “Comprehensive experimental analysis of the effects of elevated temperatures in geopolymer concretes with variable alkali activator ratios,” Journal of Building Engineering, vol. 68, ID: 106108, Doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106108