

İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARININ YÜKSEK KATMA DEĞERLİ OLARAK İNŞAAT SEKTÖRÜNE YENİDEN KAZANDIRILMASI

Oğuzhan Şahin¹, Hüseyin İlcan², Mustafa Şahmaran³

Özet

Son yıllardaki kentleşme ve şehirlerin dönüşümündeki artışlar, yeni bina ve altyapı faaliyetleri, yeniden inşa veya yenileme çalışmaları, bakım ve eskimiş binaların yıkımı muazzam miktarda inşaat ve yıkıntı atıkları (İYA) oluşumuna öncülük etmektedir. Ülkelerin İYA'yı değerlendirme şekilleri birbirinden önemli ölçüde farklılık göstermekte olsa da çoğunlukla bu değerlendirme şekilleri doğrudan kırarak yol tabanı/alt temel dolgu malzemesi olarak kullanma gibi, döngüsel ekonomi ile uyumlu olmayan, düşük verimli eski moda yöntemlerle sınırlıdır. Bu gibi verimsiz ve yetersiz değerlendirme yöntemleri göz önüne alındığında İYA ile başa çıkmak adına yenilikçi ve etkili yolların geliştirilmesi gerekmektedir. Son yıllarda İYA'nın inşaat sektöründe etkili ve verimli değerlendirilmesini sağlamak üzere çeşitli yöntemler denenmektedir. Bu çalışmada, ortaya çıkan muazzam miktardaki İYA'nın inşaat malzemelerinin üretimi aşamasında tekrar kapalı bir döngü olacak şekilde yüksek katma değerli ham madde hâline getirilebilmesini sağlayacak yöntemler detaylandırılmıştır. İYA esaslı olacak şekilde geliştirilen jeopolimer malzemesi ve bu malzemenin kullanılabilmesi için üretim teknikleri incelenmiş ve detayları sunulmuştur.

High-Value Added Recycling of Construction and Demolition Wastes to The Construction Industry

Recently, increases in urbanization and urban transformation cause the generation of enormous amounts of construction and demolition waste (CDW) due to new building&infrastructure activities, reconstruction/renovation/maintenance, and demolition of end-of-life buildings. While the ways in which countries valorized CDWs vary considerably, they are mostly limited to low-efficiency old-fashioned methods that are incompatible with the circular economy, such as directly crushing through and using as road-base/sub-base filling materials. Considering inefficient&inadequate valorization methods, innovative&effective ways dealing with CDW recycling need to be developed. Recently, various methods have been tried to ensure that CDWs are valorized effectively&efficiently in the construction sector. In this study, the methods based on how the enormous amount of CDW can be turned into high-value-added raw materials in a closed loop during the production phase of construction materials are detailed. The CDW-based geopolimer materials and the advanced production techniques using these materials are examined and all the details are presented.

olarak kabul edilmektedir [3]. Sürekli artan kentsel nüfus ve dünyadaki ülkelerin sanayileşme faaliyetleri ve ekonomilerinin sürekli geliştiği göz önüne alındığında, İYA üretiminin önemli ölçüde artması muhtemel görünmektedir. Büyük miktarda İYA malzemesi temiz depolama alanlarında depolanmakta

1. GİRİŞ

Beton dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir. Bununla birlikte, betonun ana bileşenlerinden olan çimentonun imalatı oldukça yüksek enerji tüketen ve yüksek miktarda CO₂ açığa çıkaran bir süreçtir. Küresel olarak çimento tüketimi yükselme eğilimindedir ve gelişmekte olan ülkelerde devam eden inşaat süreçleri nedeniyle gelecekte de bu artma eğiliminin devam etmesi beklenmektedir. Beton üretimi için gerekli olan çimentonun üretimi sırasında oluşan CO₂, toplam antropojenik CO₂ emisyonunun en az %9'unu oluşturmaktadır [1]. Ayrıca çimento ve beton üretiminde kireç taşı, kil ve alçı taşı gibi büyük miktarlarda doğal malzemelerin kullanılması nedeniyle çevreye verilen zarar artmaktadır [2]. Bu nedenle, son on yılda sürdürülebilirlik ve küresel ısınma konularında artan farkındalık ile çevre dostu malzeme kullanımı ve doğal malzeme kullanımının en aza indirilmesine yönelik araştırmalar artmıştır.

İnşaat ve yıkıntı atığı (İYA) endüstrisi, toplam kentsel atığın %30-40'ını oluşturan ve küresel katı atık üretimine katkıda bulunan ana sektörlerden biri

1) oguzhan.sahin@ankara.edu.tr, Ankara Üniversitesi, Ankara; 2) 3) Hacettepe Üniversitesi, Ankara

Anahtar kelimeler: İnşaat ve yıkıntı atıkları, jeopolimer, karbonatlaşma, üç boyutlu eklemeli imalat, sökülüp-takılabilir inşaat

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen BETON 2023 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

veya dolgu işlemi gibi düşük sürdürülebilir uygulamalar için kullanılmaktadır. İYA'dan elde edilen agregalar, yol temelleri/alt temelleri olarak düşük teknolojlili uygulamalarda ve yapısal kabiliyeti olmayan dolgu amaçlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Bu atık malzemeler, yanlış kontrol ve ek-sik önlemler sonucunda toksik maddelerin varlığından dolayı canlıların ve onları çevreleyen ortamların sağlığını tehlikeye atabilmektedir. Bu nedenle İYA'nın çevresel, sosyal ve ekonomik yönden uygun bir yöntemle işlenmesi/değerlendirilmesi/bertaraf edilmesi büyük önem taşımaktadır. Türkiye özelinde düşünüldüğünde, Türkiye'nin toplam bina stokunun yaklaşık 1/3'ü olan 6,5 milyon binanın yeni altyapı / kentsel dönüşüm yasası kapsamında 2040 yılına kadar yıkılması / yeniden yapılması planlanmaktadır. Bu nedenle, Türkiye'nin de bu kentsel dönüşüm faaliyetlerinden dolayı açığa çıkması beklenen büyük miktarlarda İYA ile başa çıkmak için etkili yollara ihtiyacı vardır.

Beton/çimento üretiminin tüm bu dezavantajlarını ve İYA'nın neden olduğu sorunları (özellikle Türkiye için yakın gelecekte İYA üretiminden dolayı karşılaşılması muhtemel zorluklar) göz önünde bulundurarak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda aktif atık yönetimi ve yeni malzemelerin geliştirilmesi perspektifi ile malzeme ve yapısal ölçekte etkili İYA geri dönüşümü için yenilikçi yolların geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma kapsamında, küresel boyuttaki İYA üretimi sorununu çözmek ve atık bir malzemeyi katma değeri yüksek bir ürüne dönüştürmek için bütüncül dögüsel çözümler geliştirmek için geliştirilmiş yöntemler özetlenmiştir.

2. İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARININ YENİDEN DEĞERLENDİRİLME YÖNTEMLERİ

2.1. İYA'lardan Yenilikçi Yeşil Malzemelerin Geliştirilmesi

2.1.1. İYA Esaslı Malzemeler ile Jeopolimer Üretimi

Portland çimentosu (PÇ) üretimi kaynaklı çevresel zararlar ile ilgili endişeler nedeniyle yapılan araştırmalar giderek daha yeşil (çevre dostu) bağlayıcıların geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu bağlamda geçtiğimiz yıllarda, alkali ile aktive edilmiş malzemeler (AAM) olan "jeopolimer bağlayıcı sistemler" hem akademi hem de endüstriden büyük ilgi görmüştür. Jeopolimerler belirli bir alüminosilikat mineral katkının (prekürsörün) alkali aktivatörler ile reaksiyona girmesiyle üretilmekte olup çoğunlukla iyi bilinen özelliklere sahip mineral katkılarla (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kalsine killer, metakaolin ve doğal puzolanlar) üretilmektedir [5]. Endüstriyel yan ürün (uçucu kül/cüruf) olarak adlandırılan mineral katkıların çoğunun, beton ve çimento üretiminde yaygın ve etkin kullanımları göz önüne alındığında, bu tür endüstriyel yan ürünler atık olarak değerlendirilmemektedir. Bunun yanı sıra, kalsine killer, farklı tipteki killerin özellikle büyük ölçekli üretim için uygun olma-

yacak ve enerji açısından verimsiz olabilecek şekilde yüksek sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi ile elde edilmektedir. Killi topraklar verimli olduklarından dolayı birçok ülkede yüksek kaliteli mahsullerin yetiştirilmesine tahsis edilmektedir. Bu gibi nedenlerden dolayı, günümüzde dünyanın birçok ülkesinde jeopolimer sentezinde yaygın kullanılan bu tip malzemeler PÇ'ye benzer ve bazı durumlarda daha yüksek fiyatlarla satılabilmektedir. Ayrıca, jeopolimer kullanımının avantajlı olabilmesi için yüksek nakliye masraflarından ve ulaşım kaynaklı enerji sarfiyatı/CO₂ salımından kaçınmak adına ham madde-nin bulunduğu alanların üretim merkezlerine yakın olması da önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır [6]. Bu nedenle, son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda jeopolimer bağlayıcı sistemlerin üretiminde mineral katkı olarak yerel mevcut malzemelerin kullanılmasına odaklanmaya başlanılmıştır. Tüm bu hususlar göz önüne alınarak ana akım mineral katkıları (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, vb.) ile üretilen geniş çapta araştırılmış geleneksel jeopolimerler yerine toplumları dikkate alınacak bir şekilde rahatsız eden atıklar olan İYA bileşenleri ile üretilen jeopolimerlerin geliştirilmesi öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, uygun alüminosilikat içeriğini sunan düşük aktiviteli İYA esaslı malzemeler (tuğla esaslı malzemeler, seramikler, cam atıkları, beton atıkları, vb.) kullanılarak birçok çalışmalar gerçekleştirilmiş olup proje yürütücüsünün de bu konularda son yıllarda uluslararası literatürde yer almış geniş çapta onlarca araştırması bulunmaktadır. Genel olarak yapılan çalışmalar sonucunda, jeopolimer esaslı sistemlerin performans özelliklerini kullanılan alkali aktivatör türleri ve miktarına ek olarak mineral katkıların özelliklerinin de büyük ölçüde etkilediği görülmektedir.

Yazarların daha önce yapmış olduğu çalışmalarda, İYA esaslı jeopolimer bağlayıcı sistemlerin kabul edilebilir performans özelliklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir [7-9]. Yıldırım vd. [7], alüminosilikat öncüleri olarak İYA esaslı delikli tuğla, harman tuğla ve çatı kiremiti ile alkali aktivatör olarak NaOH içeren alkali aktive edilmiş bağlayıcıların geliştirilmesi/karakterizasyonu üzerine bir çalışma yürütmüştür. Karışımlar, farklı NaOH molariteleri (10, 15 ve 19M) ve İYA bazlı öncüllerin (bağlayıcının toplam ağırlığına göre %75-25, %50-50, %25-75) kombinasyonları ile hazırlanmış ve farklı sıcaklıklarda (95, 105, 115 ve 125 °C) 1, 2 ve 3 gün süreyle kürlenmiştir. Sonuçlara göre, delikli tuğlanın basınç dayanımına en çok katkı sağlayan öncül olduğu ortaya çıkmıştır. Bu çalışma, 15M-NaOH ile hazırlanan ve %25 harman tuğla ve %75 delikli tuğla kombinasyonunu içeren 115 °C 48 saat kürlenmiş numunelerden 80 MPa'ya kadar basınç dayanımı elde edilerek İYA esaslı jeopolimerlerin üretilebileceğini göstermiştir. Başka bir çalışmada, Ulugöl vd. [8], delikli tuğla, çatı kiremiti, harman tuğla ve cam atığını NaOH aktivatörü ile aktive ederek jeopolimer karışımlar

üretmiştir. Karışımlar, farklı Na konsantrasyonlarında NaOH çözeltisi (%10, %12 ve %15) ve İYA bazlı öncüler kullanılarak hazırlanmıştır. Üretilen numuneler 50, 65, 75, 85, 95, 105, 115 ve 125 °C sıcaklıklarında 1, 2 ve 3 gün süreyle ısı küre tabii tutulmuştur. Sonuçlara göre, en yüksek basınç dayanımı sonuçları 115 °C 24 saat süreyle kürlenmiş delikli tuğla ve %12 Na konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerden elde edilmiştir (45 MPa). Delikli tuğla esaslı karışımlardan elde edilmiş bu sonuç, delikli tuğlanın diğerlerinden daha yüksek toplam Al_2O_3 ve SiO_2 içeriğine sahip olmasına bağlanmıştır. Ayrıca, çatı kiremiti ve harman tuğla esaslı karışımların benzer basınç dayanımı sonuçları gösterdiği ve cam esaslı karışımların büyük olasılıkla cam partiküllerinde Al_2O_3 eksikliği ve daha iri partikül boyutu nedeniyle en düşük basınç dayanımı sonuçları gösterdiği gözlenmiştir. İlcın vd. [9] tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada, alüminosilikat öncül malzeme olarak çatı kiremiti, delikli tuğla, harman tuğla, beton ve cam atığı ve alkali aktivatör olarak NaOH, $Ca(OH)_2$ ve Na_2SiO_3 kullanılarak jeopolimer harç karışım tasarımları yapılmıştır. Hem taze özellikler hem de mekanik özelliklere odaklanan bu çalışmada, farklı alkali aktivatörler kombinasyon hâlinde kullanılmış ve ortamın alkalinite düzeyinin İYA esaslı jeopolimerlerin performans özellikleri üzerinde hem taze hem de mekanik özellikler açısından oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ortam küreine tabii tutulan jeopolimer harç karışımlarından 28 gün sonunda maksimum basınç dayanımı 36 MPa olarak elde edilmiştir. Bu literatür çalışmalarından da açıkça görüldüğü gibi, İYA bazlı öncüller, jeopolimer üretiminde başarıyla kullanılabilir.

2.1.2. İYA Esaslı Malzemeler ile Özellikleri İyileştirilmiş Agrega Üretimi

Birkaç on yıldır somut ve etkili önlemler alınmasına rağmen, atmosferdeki CO_2 konsantrasyonu hâlâ artarak küresel ısınmaya katkıda bulunmaktadır. İnşaat/çimento sektörü, son yıllarda ulusal ve uluslararası politikaların çevre sorunları temelinde artan baskısı sonucu CO_2 emisyonlarını azaltmak için büyük çaba göstermektedir ancak, kapsam hâlâ çok sınırlıdır. Bu nedenle inşaat endüstrisi CO_2 seviyesini somut bir şekilde düşürmek için alternatif yöntemler aramaya devam etmektedir.

Geleneksel çimento bazlı sistemlerde başarıyla kullanılan İYA esaslı geri dönüştürülmüş agregaların miktarı, yüzeylerinde daha yüksek su emme/aşınma/gözenekliliğe, doğal agregalara kıyasla daha fazla heterojenlik, daha düşük yoğunluğa yol açan harç/alçı kalıntıları nedeniyle nispeten düşüktür (ağırlıkça %40 [maks]) [10]. Özellikle ince geri dönüştürülmüş beton agregası (GDA) (<4 mm) oldukça az kullanılmaktadır. Zaman/enerji gereksinimleri onları uygulanamaz kılsa da GDA'ların özelliklerini iyileştirmek için çeşitli yöntemler (örneğin, mekanik öğütme, asit/sodyum silikat çözeltisi, mikrodalga ısıtma) önerilmiştir. $CaCO_3$ mineralizasyonu, GDA gözeneklerini karbonatlaşma

yoluyla rafine ederek çimento bazlı malzemelerin özelliklerini geliştirmek için en uygun maliyetli/çevre dostu yöntemlerden biri olarak literatürde yer almaktadır. GDA'ları hızlandırılmış karbonasyonla işlemek, gelişmiş yoğunluk/düşük su emme/yüksek dayanım sağlamak ve karbonasyon süreci, GDA'ların mineralizasyon koşullarını (sıcaklık, basınç, nem, CO_2 konsantrasyonu, vb.) optimize ederek çok daha hızlı olabilmektedir [11]. Bu konu üzerine yazarlar da çeşitli çalıştırmalar yürütmüştür (Şekil 1). Yapılan bir çalışmada [12], karbonatlaşmış GDA'ların su emme kapasiteleri karbonatlaşma işlemi neticesinde %33,26 oranında azalmış ve karbonatlaşmış GDA içeren matrisin basınç dayanımı içermeyene kıyasla %16 daha fazla olmuştur. Bu çalışmadan hareketle, karbonatlaşma işleminin İYA esaslı malzemelerin yüksek katma değerli dönüşümünü sağlamak üzere kullanılabilir bir yöntem olduğu söylenebilir.



Şekil 1. İYA-esaslı malzemelere uygulanan karbonatlaşma işlemi

2.2. İYA'ların Yenilikçi Üretim Teknikleri Kullanılarak Yapı Elemanlarına Dönüştürme Metotları

2.2.1. 3-Boyutlu Eklenebilir İmalat Yöntemiyle İYA-esaslı Malzemelerin Yazdırılması

Son yıllarda gelişmesinde önemli bir ivme kazanılan yeni nesil çevreci yapı malzemelerinin yanında bu malzemelerin üretilmesinde ileri teknoloji imalat teknikleri de kullanılmaktadır. Bu tekniklerden olan dijital fabrikasyon amaçlı eklenebilir imalat (Eİ) katman üzerine katman eklemeye olarak tanımlanmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte, eklenebilir beton yapı imalatı, mevcut beton endüstrisinin bazı zorluklarına çözüm olabilecek yaklaşımlardan bir tanesi olarak benimsenmiştir. Üç boyutlu (3B) Eİ ile yapıların inşası, geleneksel beton üretim yöntemlerine kıyasla çok daha fazla tasarım özgürlüğü tanıyan, daha ucuz, daha hızlı, daha ekonomik, işçilik hatalarını ortadan kaldıran, kalıp gerektirmeyen ve daha sürdürülebilir yöntemdir. İYA-esaslı jeopolimer malzemelerinin 3B-Eİ yoluyla kullanılmasıyla, dijital fabrikasyon ile yapı malzemeleri alanındaki teknolojik gelişmeler bir araya getirilerek, İYA'ların çevre, ekonomi ve toplum üzerindeki göz ardı edilemeyecek olumsuz etkilerini azaltmak/önlemek için küresel olarak uygulanabilir yeni nesil çözümler geliştirilmiş olacağı düşünülmektedir (Şekil 2).

Literatürde hâlihazırda bulunan çalışmalar, İYA esaslı malzemelerin aktivasyon aşamasında kullanılan alkali aktivatörlerin içerik ve dozajlarında ayarlamalar yaparak, bu tür yeni nesil bağlayıcıların 3B-Eİ ile yapı elamanları üretimine uygun hâle getirilebileceğini kanıtlamıştır [4,9]. Her ne kadar, yön bağımlı olarak mekanik özelliklerde katman üzerine katman üretimi kaynaklı düşüşler gözlemlense de genel olarak 3B-Eİ ile üretilmiş ürünlerin performansı konvensiyonel sistemler ile üretilmiş ürünler ile benzer performans gösterebilmektedir [13].



Şekil 2. İYA-esaslı malzemelerin 3B-Eİ ile üretilmesi

2.2.2. İYA-esaslı Malzemelerin Sökülüp-Takılabilen Yapısal Eleman Üretiminde Kullanılması

İnşaat faaliyetlerinin çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltmak için kullanılacak yöntemlerden bir tanesi de yapıların yapısal bileşenlerinin hizmetlerinden sonra yeniden kullanılmasını sağlamaktır. Bu geniş çapta tartışılmış ve pek çok kişinin ilgisini çekmiş olsa da ana akım yapıların bu şekilde rekabetçi bir maliyetle inşa edilmesi mümkün olmadıkça, yapısal bileşenlerin yeniden kullanımının gerçekleşmeyeceği düşünülmektedir. Şu anda, bir binanın ömrünün sonunda, tüm çelik ve beton malzemeler hizmet vermeye devam etse de bina yıkılmakta ve büyük çelik elemanlar enerji yoğun eritme ile geri dönüştürülmektedir. Bunun yanında malzemenin geri kalanı daha çok çöpe atılmakta veya verimsiz bir şekilde geri dönüştürülmektedir. Bu tür atıkları büyük ölçüde azaltmak için, yapıların hizmetten sonra yeniden kullanılmak üzere tasarlanması ve inşa edilmesi norm hâline gelmelidir. Betonarme yapı elemanlarının servis sonrası tekrar kullanılabilir hâle getirilmesi, malzeme verimliliği stratejisinde bir öncelik olmalıdır. Yeniden kullanılabilir yapısal bileşenlerin başarısının anahtarı, yapı sistemini kullanım ömrü sonunda kolayca sökülebilir hâle getirmektir. Sökülebilir yapısal sistemler, inşaat hızı, tasarım esnekliği, maliyet azaltma ve enerji ve malzeme tasarrufu gibi birçok sürdürülebilir fayda sunmaktadır. Sökülebilir yapı elemanları, hızlı bir şekilde kurulabildiğinden/çıkarılabildiğinden veya genişletilebildiğinden daha az kesinti ve büyük tasarruf sağlamaktadır ancak, inşaat mühendisliği camiasının bu sistemi kabul etmesi için kapsamlı

bir test programının yürütülmesi gerekmektedir. Dünyada on binlerce mülteciyi evsiz bırakan ani siyasi krizler ve hayatta kalanlar için yetersiz konutlara neden olan doğal afetler düşünlüldüğünde, acilen düşük maliyetli üretilmiş bir barınma ihtiyacı bulunmaktadır. Yeşil prefabrik bina sistemleri yaratılarak bu taleplerin hem evsizler hem de geçekodu sakinleri için rahatlıkla karşılanabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, yazarlar bu tür gereklilerin ortaya çıkardığı motivasyon ile İYA-esaslı jeopolimer sistemlerin sökülüp-takılabilen Lego benzeri üretim tekniklerinde kullanılmasını esas alan birçok çalışma yürütmüştür (Şekil 3) [14,15]. Yapılan çalışmalar neticesinde, İYA-esaslı malzemeler kullanılarak üretilmiş betonlar ile sökülüp-takılabilen yapısal elamanları (kolon, kiriş, döşeme vb.) geliştirilebilmiştir. Bu sayede, İYA gibi düşük kaliteli ve çevresel yükü olan bir atığın, yüksek katma değerli bir şekilde yenilikçi bir üretim tekniğinde kullanımının önü açılmıştır.





Şekil 3. İYA-esaslı malzemelerin söküp-takılabilen yenilikçi üretim tekniğinde kullanımı

3. SONUÇ

Dünya genelinde katı atıkların büyük bir kısmını oluşturan ve çok ciddi oranlarda ekonomik ve çevresel yükü olan inşaat ve yıkıntı atıklarının yüksek katma değerli bir şekilde geri dönüşümünü sağlayan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. İYA'ların döngüsel ekonomiye tekrardan kazandırılmasıyla, temiz tarım alanlarının geri kazanımı, depolama ve yıkım kaynaklı toprak, su ve hava kirliliğinin azaltılması, atıkların bertarafı ve katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi sağlanmış olacaktır. Literatürdeki çalışmalar İYA'nın potansiyelini ortaya çıkarmış ve ilerleyen süreçlerde sağlanan iyileştirmeler ile birlikte bu tür atıkların inşaat sektörünün daha farklı kullanım alanlarında yaygın olarak kullanılabilceğini göstermiştir. Bu atıkların tekrardan inşaat sektöründe kullanılmasıyla birlikte, çimento ve beton üretimi kaynaklı çevresel yükü yüksek olan inşaat sektörü ciddi bir adım atmış olacak ve artan yerleşim ve altyapı ihtiyaçlarına daha çevreci ve ekonomik çözümler üretmek adına büyük adımlar atmış olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119N030 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

1. Monteiro, P. J., Miller, S. A., Horvath, A., "Towards sustainable con-

crete. Nature materials", No. 16(7), pp. 698-699, 2017.

2. Scrivener KL, Kirkpatrick RJ., "Innovation in use and research on cementitious material", Cement and Concrete Research, No. 38, pp.128-136, 2008.
3. Wang, J., Wu, H., Duan, H., Zillante, G., Zuo, J., Yuan, H., "Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: A case study", Journal of cleaner production, No.172, pp. 3154-3166, 2018.
4. Şahin, O., İlcan, H., Ateşli, A. T., Kul, A., Yıldırım, G., Şahmaran, M., "Construction and demolition waste-based geopolymers suited for use in 3-dimensional additive manufacturing", Cement and Concrete Composites, No.121, 104088, 2021.
5. Provis, J. L., "Alkali-activated materials", Cement and Concrete Research, No.114, pp. 40-48, 2018.
6. Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., Singh, M., "Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete", Journal of Cleaner Production, No.254, 120147, 2020.
7. Ulugöl, H., Kul, A., Yıldırım, G., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D. and Ashour, A., "Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. Journal of Cleaner Production, No.280, 124358, 2021.
8. Yıldırım, G., Kul, A., Özçelikci, E., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., Ashour, A., "Development of alkali-activated binders from recycled mixed masonry-originated waste ", Journal of Building Engineering, No.33, 101690, 2021.
9. Ilcan, H., Sahin, O., Kul, A., Yıldırım, G., Sahmaran, M., "Rheological properties and compressive strength of construction and demolition waste-based geopolymer mortars for 3D-Printing", Construction and Building Materials, No.328, 127114, 2022.
10. Tam, V. W., Soomro, M., Evangelista, A. C. J., "A review of recycled aggregate in concrete applications", Construction and Building Materials, No.172, pp.272-92, 2018.
11. Zhan, B., Poon, C. S., Liu, Q., Kou, S., Shi, C., "Experimental study on CO2 curing for enhancement of recycled aggregate properties", Construction and Building Materials, No.67, pp. 3-7, 2014.
12. Sonmez, M., İlcan, H., Dunder, B., Yıldırım, G., Ersan, Y. C., Sahmaran, M., "The effect of chemical-versus microbial-induced calcium carbonate mineralization on the enhancement of fine recycled concrete aggregate: A comparative study", Journal of Building Engineering, No.44, 103316, 2021.
13. Demiral, N. C., Ekinci, M. O., Sahin, O., İlcan, H., Kul, A., Yıldırım, G., Sahmaran, M., "Mechanical anisotropy evaluation and bonding properties of 3D-printable construction and demolition waste-based geopolymer mortars", Cement and Concrete Composites, No.134, 104814, 2022.
14. Almahmood, H., Ashour, A., Figueira, D., Yıldırım, G., Aldemir, A., Sahmaran, M., "Tests of demountable reinforced concrete slabs. In Structures" Vol. 46, pp. 1084-1104, 2022.
15. Figueira, D., Ashour, A., Yıldırım, G., Aldemir, A., Şahmaran, M., "Demountable connections of reinforced concrete structures: Review and future developments", In Structures, Vol. 34, pp. 3028-3039, 2021.