

A Resource Survey on the Use of Waste Foundry Sand by Substituting Natural Aggregate in Industrial Waste Based Geopolymer Concrete

Şevki EREN 

Kırşehir Ahi Evran University, Vocational School, Department of Construction Technology, 40200, Merkez/KIRŞEHİR

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 11/07/2020

Revision: 09/09/2020

Accepted: 10/09/2020

Highlights

- Substitution.
- Waste Foundry Sands.
- Industrial Waste Based GPC.

Keywords

Waste Foundry Sand
 Geopolymer Concrete
 Industrial Wastes
 Substitution
 Alkaline Activators

In this study, the effects of the use of waste foundry sands (WFS), which is an industrial waste type, by substituting natural fine aggregates in geopolymer concrete (GPC) were investigated

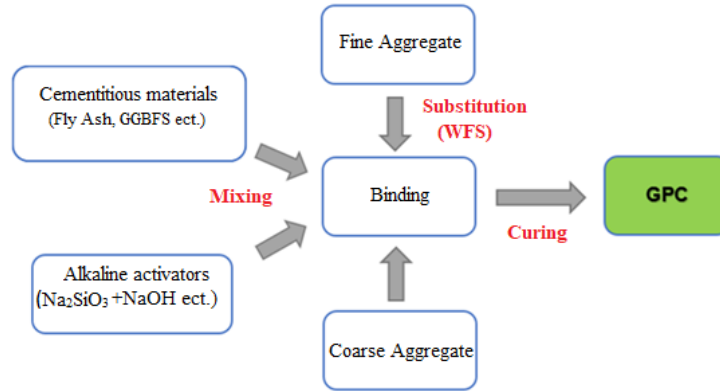


Figure A. Formation scheme of geopolymer concrete

Purpose: The main purpose of this study is to examine the literature studies on the basis of recycling and recovery process by reusing solid waste by-products such as WFS, fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBFS) in the GPC.

Theory and Methods: In this study, the effects of the use of waste foundry sands (WFS), which is an industrial waste type, by substituting natural fine aggregates in geopolymer concrete (GPC) were investigated

Results: As a result of the investigations, it has been determined that there are a limited number of studies in the literature on the use of WFS as a substitute for natural sand in various industrial waste-based GPCs. In these studies, it was revealed that the focus was mostly on mechanical properties and the compressive strength among mechanical properties was examined more. In addition, it was observed that different WFS optimum substitution rates were determined in determining the compressive strength of WFS substituted GPCs. It has been determined that WFS substitution decreases the overall cost, workability, water absorption, and sorptivity of GPC produced with various industrial wastes. It is reported that GPC produced with the addition of WFS has better resistance against acid and sulfate attack compared to conventional concrete.

Conclusion: It is thought that a comprehensive investigation of features such as physical (freeze-thaw, thermal conductivity, TGA etc.), chemical (FT-IR etc.), mechanical (impact, hardness etc.), durability, microstructure and radiological, etc. of GPCs substituted with different ratios of WFS with interdisciplinary studies on subjects that have not been adequately researched in the literature will contribute to the literature in many ways. By taking advantage of the knowledge and experience obtained from the studies, it is thought that a great gain will be achieved in the direction of expanding the fields usage of WFS substituted industrial waste-based GPC, increasing its strength, reducing cost, providing a potential sustainable resource for GPC production, reducing disposal and disposal costs by evaluating wastes, protecting natural resources and minimizing the negative impact of cement that causes environmental pollution due to CO₂ emission.



Endüstriyel Atık Bazlı Jeopolimer Betonda Atık Döküm Kumunun Doğal Agregaya Yerine İkame Edilerek Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması

Şevki EREN 

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, 40200, Merkez/KIRŞEHİR

Öz

Kentleşme ve sanayileşmenin artması, nehir kumu ve çakıllar gibi doğal kaynakların aşırı kullanılmasına yol açmakta, düzenli depolama alanlarında atıkların depolanması ve bertaraf yöntemleri büyük ekonomik yükümlülükler meydana getirmekte ve çevresel kaygıların artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle katı atık yan ürünlerini ve malzemelerini yeniden konumlandırarak yönetmek çekici bir alternatif bertaraf biçimi haline gelmiştir. Bu çalışmada, endüstriyel bir atık türü olan atık döküm kumlarının (WFS) doğal ince agregaya yerine ikame edilerek kullanımının jeopolimer betondaki (GPC) etkileri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, araştırma konusu olan WFS'nin doğal kum yerine ikame edilerek çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de kullanımına yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma olduğu ve bu çalışmalarda daha çok mekanik özellikler üzerine yoğunlaşıldığı ve en çok basınç dayanımının incelendiği belirlenmiştir. Ayrıca, WFS ikameli GPC'lerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde farklı WFS optimum ikame oranlarının belirlendiği görülmüştür. WFS ikamesinin çeşitli endüstriyel atıklarla üretilen GPC'nin yapım genel maliyetini, işlenebilirliğini, su emme ve kılcal geçirimsizliğini düşürdüğü belirlenmiştir. WFS ilavesiyle üretilen GPC'nin geleneksel betona göre asit ve sülfat saldırısına karşı daha iyi direnç gösterdiği bildirilmiştir. Bu alanda literatürde henüz yeterince araştırılmamış konular üzerinde yapılacak disiplinler arası çalışmalarla farklı oranlarda WFS ikameli GPC'lerin fiziksel, kimyasal, mekanik, durabilite, mikro yapı incelemeleri, radyolojik vb. özelliklerin kapsamlı bir şekilde araştırılmasının birçok yönden literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/07/2020
Düzeltilme: 09/09/2020
Kabul: 10/09/2020

Anahtar Kelimeler

Atık Döküm Kumu
Jeopolimer Beton
Endüstriyel Atıklar
İkame
Alkali Aktivatörler

Keywords

Waste Foundry Sand
Geopolymer Concrete
Industrial Wastes
Substitution
Alkaline Activators

A Resource Survey on the Use of Waste Foundry Sand by Substituting Natural Aggregate in Industrial Waste Based Geopolymer Concrete

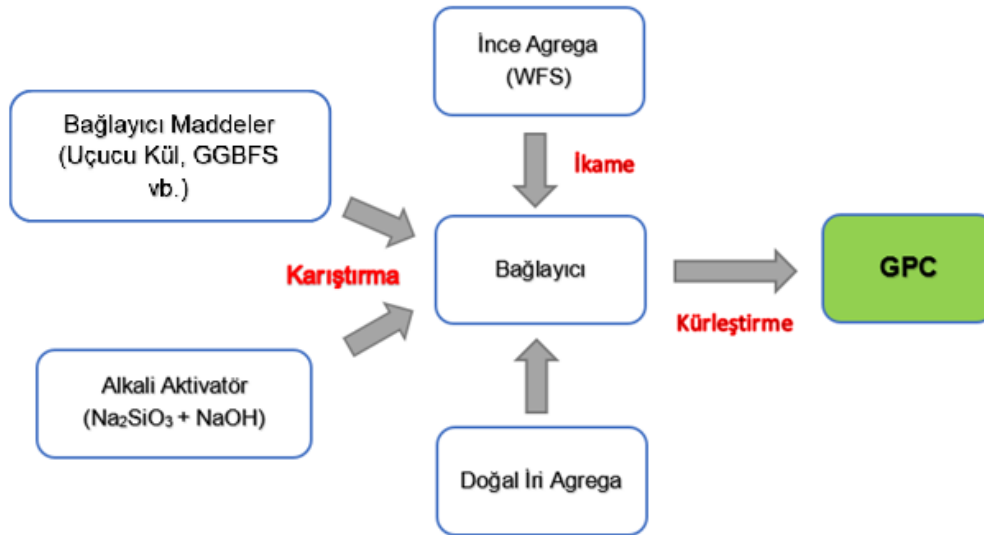
Abstract

Increasing urbanization and industrialization leads to excessive use of natural resources such as river sand and gravels, storage and disposal methods of wastes in sanitary landfills create great economic obligations and increase environmental concerns. Therefore, managing solid waste by-products and materials by repositioning has become an attractive alternative form of disposal. In this study, the effects of the use of waste foundry sands (WFS), which is an industrial waste type, by substituting natural fine aggregates in geopolymer concrete (GPC) were investigated. As a result of the investigations, it has been determined that there are a limited number of studies in the literature on the use of WFS as a substitute for natural sand in various industrial waste-based GPCs. In these studies, it was revealed that the focus was mostly on mechanical properties and the compressive strength among mechanical properties was examined more. In addition, it was observed that different WFS optimum substitution rates were determined in determining the compressive strength of WFS substituted GPCs. It has been determined that WFS substitution decreases the overall cost, workability, water absorption, and sorptivity of GPC produced with various industrial wastes. It is reported that GPC produced with the addition of WFS has better resistance against acid and sulfate attack compared to conventional concrete. It is thought that a comprehensive investigation of features such as physical, chemical, mechanical, durability, microstructure, radiological, etc. of GPCs substituted with different ratios of WFS with interdisciplinary studies on subjects that have not been adequately researched in the literature will contribute to the literature in many ways.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel yan ürünler ve atık maddelerin artan miktarları, düzenli depolama alanı eksikliği, gittikçe daha büyük çevre sorunları haline gelmektedir [1]. Atıkların bertaraf maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, çoğu atık üreticisi atıklarını çevre mevzuatında tanımlanan süreler içerisinde bertaraf tesislerine göndermek yerine fabrika sahaları içinde biriktirmeyi tercih ettiğinden, yapılan uygunsuz biriktirmeler zamanla su, toprak ve hava kirliliğine neden olmaktadır. Ülkemizde bu tür atıkların geri kazanım süreçleri içinde yeterince değerlendirilmemesi nedeniyle atıklar, atık üreticileri tarafından düzenli depolama tesislerinde bertaraf ettirilmekte ya da alternatif olarak çimento fabrikalarına gönderilmektedir. Atıkların geri dönüşüm ve geri kazanım süreci içinde değerlendirilmeden bertarafı hem ekonomik hem de enerji olarak ciddi kayıplar yaşanmasına neden olmaktadır [2]. Bu nedenle katı atık yan ürünlerini ve malzemelerini yeniden konumlandırarak yönetmek çekici bir alternatif bertaraf biçimi haline gelmiştir [1].

Birçok araştırmacı, bertaraf sorunlarını azaltmak, GPC'nin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve GPC'nin maliyetini azaltmak için cam tozu, taban külü, GGBFS, uçucu kül, çelik çürufu, bakır çürufu, silis dumanı, M-Kum, mikro silika, nano silika, WFS vb. endüstriyel atık malzemelerin doğal malzemeler ile ikame edilerek kullanımına yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir [3],[4]. Bu çalışmada, GPC üretiminde endüstriyel bir atık türü olan atık döküm kumlarının (WFS) doğal ince agrega yerine ikame edilerek kullanımının çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'deki etkileri incelenmiştir. Çalışmada WFS kullanılmasının sebebi, son birkaç on yılda WFS'nin betonda normal kumun kısmi ve tamamen değiştirilerek eklenmesinin etkisini araştırmak için yapılan çeşitli çalışmalar neticesinde, WFS'nin betondaki doğal kuma alternatif olarak kullanılabilir umut verici bir malzeme özelliği taşıdığı ve betonda kısmi kum ikamesi olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmış olmasıdır. Ancak, WFS yüksek miktarda silika içermekte ve alümina ve kalsiyum içermemektedir. Bu nedenle, jeopolimer oluşturmak ve basınç dayanımlarını arttırmak için alümina ve kalsiyum içeren birkaç atık malzemenin eklenmesi gerekmektedir. Jeopolimerler ve alkali aktif bağlayıcılar; uçucu kül ve GGBFS gibi endüstriyel yan ürünleri kullanarak sıradan Portland çimentosunun yerini tamamen alır ve bu da betonu daha az enerji yoğun ve çevre dostu hale getirir [5]. Araştırması yapılan konuda GPC'nin oluşum şeması Şekil 1'de verilmiştir.



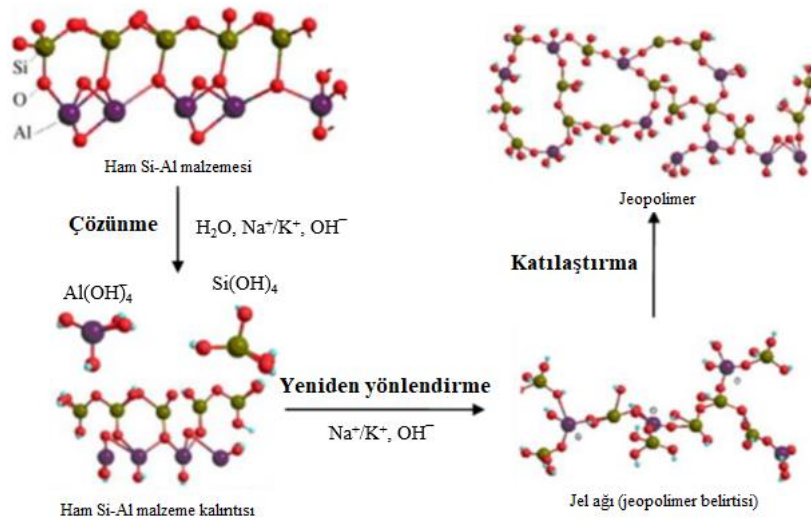
Şekil 1. GPC oluşum şeması.

Çalışmada öncelikle GPC hakkında kısa bir bilgi verildikten sonra atık döküm kumlarının elde edilişi, WFS'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri, sektörde açığa çıkan kullanılmış döküm kumu miktarı, WFS'nin yapı sektöründeki uygulamaları tanıtıldıktan sonra WFS'nin GPC'de kullanımı üzerine çeşitli yazarlar tarafından yapılan literatür araştırmaları sunulmuştur.

2. JEOPOLİMER BETONLAR (GEOPOLYMER CONCRETES)

Jeopolimer, endüstriyel yan ürünler olan alüminosilikat malzemeler ile alkalın aktivatörleri arasındaki kimyasal reaksiyondan (jeopolimerizasyon) oluşur. Bir başka ifadeyle jeopolimer, kaya oluşturan

minerallerin ideal özelliklerini gösteren amorf bir alümino silikat semantasyon malzemesidir [6],[7]. Yani, kaynak malzemeler ve alkali sıvılar jeopolimerin iki ana bileşenidir. Silikon ve alüminyum açısından zengin doğal mineraller jeopolimerler için kaynak malzemelerdir [6]. Alkalın aktivatörleri genellikle sodyum (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) ile sıvı sodyum veya kalsiyum silikatın bir karışımıdır [8]. Jeopolimerizasyonda kullanılan en yaygın alkali sıvı ise, sodyum hidroksit ve sodyum silikatın bir kombinasyonudur [6]. Alüminosilikat malzemeler alkalın aktivatörleri ile reaksiyona girdiğinde, sodyum alüminosilikat hidrat jel (NASH) ve kalsiyum silikat hidrat (CSH) jel ürettiğinde jeopolimer ağ oluşumunun iki fazı meydana gelir. Bu iki jel ağı jeopolimer üretiminde farklı işlemlere sahiptir. NASH, üç boyutlu bir yapı oluşturan ortak oksijen atomlarına sahip bir tetrahedral SiO_4 ve AlO_4 ağıdır. CSH, alkali ile aktive edilen malzemelerde ana bağlayıcı fazdır ve bir polimer gibidir. Böylece CSH, jeopolimerlerin basınç dayanımını artırabilir [9]. Bu reaksiyonlardaki 3 ana adım aşağıdaki gibi özetlenebilir (Şekil 2) [6].



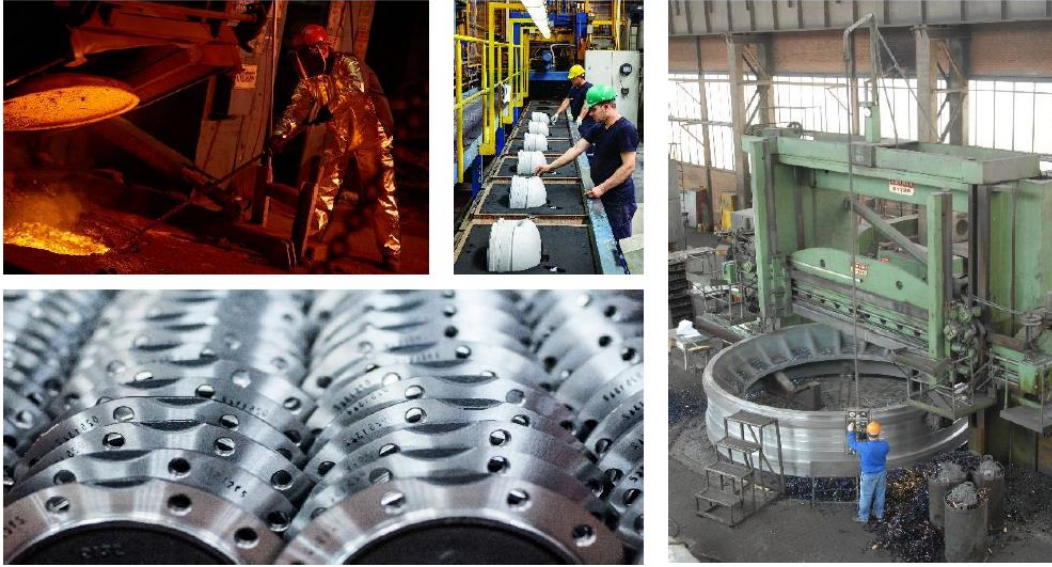
Şekil 2. Tipik jeopolimerizasyonun şematik çizimi.

Jeopolimer aktivasyonunda bahsedilebilecek başlıca faktörler toz haline getirilmiş tanelerin spesifik yüzeyi, kür sıcaklığı ve kür süresidir. Aktivasyonda en uygun yöntem kimyasal aktivasyon yöntemidir ve genellikle bu yöntemde aktivatör olarak NaOH veya KOH kullanılır [7].

Davidovits (1988) jeolojik orjinli bir kaynak malzeme içerisindeki veya uçucu kül ve pirinç kabuğu külü gibi yan ürünler içerisindeki silikon (Si) ve alüminyum (Al) ile reaksiyon oluşturarak bağlayıcı üretmek için bir alkalın sıvının kullanılabilmesini önermiştir. GPC'de, kaynak malzemelerde bulunan silika ve alümina önce bir jel oluşturmak için alkalın aktivatörleri tarafından indüklenir. Bu jeopolimer jel, GPC'yi oluşturmak için karışımdaki gevşek agregatları ve diğer reaksiyona girmemiş malzemeleri bağlar. GPC'nin üretimi normal beton teknolojisi yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Jeopolimer ürünleri hava şartlarına karşı iyi bir sürdürülebilirlik sağlar; ancak $400\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki yüksek sıcaklığa dayanıklı değildirler [3],[10]. Önceki test sonuçlarına referansla, GPC'nin; mekanik mukavemet, çevresel koşullara maruz kalma, yangına dayanıklılık vb. özellikleri açısından geleneksel betona göre avantaj sağladığını kanıtlamaktadır [3]. Geleneksel betonunun aksine GPC, CO_2 emisyonlarının azaltılması, atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve doğal kaynakların korunması için önemli bir potansiyele sahiptir [11],[12]. GPC'nin bileşimi son kullanıcıya göre değişebilir ve ince ve kaba agregalar, WFS, düşük kalsiyumlu uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBFS) vb. endüstriyel atık malzemelerle birlikte alkalın çözeltisinden oluşabilir [13]. Aktivatör tipi ve alkali konsantrasyonunun rolü, hammaddelerin belirgin dozu, katkıların etkisi, kür sıcaklığının etkisi, mekanik mukavemet, termal mukavemet ve dayanıklılık vb. ile bu iki sistem üzerinde araştırmalar yapılmıştır [3],[13].

3. ATIK DÖKÜM KUMLARI (WASTE FOUNDRY SANDS)

Türkiye'nin büyük ilk 500 sanayi kuruluşu içinde yer alan dökümhaneler [14] metal döküm üretimi sonrasında prosenin gereği olarak atık döküm kumlarının sürekli olduğu sektörlerdendir [15]. "Sektörde dökümlerin büyük bir kısmı kum kalıplar kullanılarak yapılmaktadır. Dökümhanelerde kalıp yapımında kullanılan kumun esas görevi, sıvı metal dökülüp katılaşmaya kadar kalıp boşluğunu bozulmadan korumaktır. Dökümün hatasız ve kaliteli olması için döküm kumunun belirli özelliklere sahip olması gerektiğinden her tipte kum bu amaçla kullanılamamaktadır. Kum kalıplar her döküm işleminden sonra açılarak dökülen parça çıkarıldıktan sonra kumdaki büyük parçalar elenmek suretiyle uzaklaştırılmaktadır. Bu süreçte miktarı azalan kum kadar sisteme yeni kum eklenerek tesiste çevrim devam etmektedir. Fakat döküm kumu belli bir çevrimden sonra döküm kalıplarında daha fazla kullanılamayacak hale gelmekte ve kullanılmış WFS kumu olarak dökümhaneden uzaklaştırılmaktadır. Bunun sebepleri; döküm sırasında yaklaşık 1500 °C'deki ergimiş metale maruz kalarak fiziko-kimyasal olarak bozulması, tanelerin birbirine tutunmasını sağlayan doğal malzeme 'bentonit'in bağlayıcılık özelliğini kaybetmesi ve mekanik aşınmayla kum tanelerinin direncinin kırılmasıdır" [16]. Metal döküm sektörüne ait görsel Şekil 3'te gösterilmektedir [17].



Şekil 3. Metal döküm sektöründe ait bir görsel [17].

3.1. WFS'nin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Physical and Chemical Properties of WFS)

WFS hem demir içeren hem de demir içermeyen metal döküm endüstrilerinin üretiminin bir yan ürünü olan yüksek kaliteli silika kumudur. Yüksek ısı iletkenliği nedeniyle yüzyıllar boyunca kalıp döküm malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çeşitli döküm işlemleri için ham kum kullanılır ve özelliklerini geliştirmek için birkaç bağlayıcı ve katkı maddesi eklenir. Kullanılan bağlayıcı sisteme dayanarak, WFS iki kategoriye ayrılır: Bunlar; kil-bağlı (yeşil) kumlar ve kimyasal olarak bağli kumlardır. İsimlerden de anlaşılacağı üzere, kil bağli kum veya yeşil kum bağlayıcı olarak kilden oluşurken kimyasal olarak bağli kumlarda bağlayıcı olarak kimyasallar kullanılır. Yeşil döküm kumu, döküm yüzeyinin son halini iyileştirmek için genellikle %85-95 silis kumu, bağlayıcı olarak %4-10 bentonit kili, daha sonra %2-10 karbonlu katkı maddesinden oluşur. Aynı zamanda MgO, K₂O, TiO₂ gibi oksit izleri de içerir. Oysa kimyasal olarak bağli kum veya kimyasal döküm kumu, %93-99 silika kumu ve yaklaşık %1-3 kimyasal bağlayıcıdan oluşur [1]. Silis kumu ve kimyasallar iyice karıştırılır ve daha sonra bir katalizör, kalıp kütlelerini küreştiren ve sertleştiren reaksiyonu başlatır. En yaygın kullanılan kimyasal bağlayıcılar epoksi reçineleri, sodyum silikatlar, furil alkol, fenolik üreanlar vs.'dir. Karbonlu katkı maddelerinin varlığı yeşil döküm kumuna siyah renk verirken, kimyasal döküm kumu açık renktedir. Kalıplama işlemleri için yeşil döküm kumu tercih edilirken, erimiş metalin sıcaklığına dayanması için daha yüksek mukavemet gerektiren çekirdek yapım işlemlerinde ve kalıp yapım işlemlerinde kimyasal döküm kumu kullanılır [18].

WFS'lerin fiziksel özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda aşağıdaki bilgiler yer almaktadır. Kaynaklandığı endüstri sektörü, döküm prosesi türü, kalıplama için kullanılan katkı maddeleri türü, kumun geri dönüşüm sayısı ve kullanılan bağlayıcı türü ve miktarına bağlı olarak WFS'lerin fiziksel ve kimyasal özellikleri değişebilmektedir. WFS'lerin silika içeriği normal kumdan daha düşük bulunmuştur [19]. Parçacıklarının yaklaşık %85-90'ı 100 µm'den küçüktür. WFS genel olarak, 0.05-2 mm aralığında belirgin parçacık boyutunda olan kumdan oluşur [20]. Temel olarak ince agrega olduğundan doğal kumun yerine birçok uygulamada kullanılması beklenebilir [21]. Ancak, WFS normal kumun tamamen değiştirilmesi için kullanılmayacak kadar incedir. WFS'nin incelik modülü, normal kumdaki 2.3-3.1'lik incelik modülüne kıyasla 0.9-1.6 aralığında bulunmuştur. WFS'nin parçacık boyutu dağılımına göre, geçişin %50'sine (d50) karşılık gelen boyutun 33 µm civarında olduğu ve döküm kum parçacığının ortalama çapının 28.8 µm olduğu gözlenmiştir [22]. WFS'nin tane büyüklüğü dağılımı çok uniformdur ve malzemenin yaklaşık yüzde 85-95'i 0.6 mm ile 0.15 mm elek boyutları arasındadır. WFS'nin yüzde 5-12'sinin 0.075 mm'den küçük olması beklenebilir [4]. Parçacık şekli tipik olarak yuvarlatılmış açısaldır ve ASTM C33'e göre ince agregalar için derecelendirme gereksinimlerini karşılamamaktadır [23]. Bu nedenle, ince agreganın standart spesifikasyonlarını karşılamak için sadece kaba kumla kısmi değiştirmenin yapılması önerilmektedir [4]. WFS'nin özgül ağırlığının 2.39 ile 2.55 arasında değiştiği bulunmuştur [24]. Bu değişkenlik, farklı numunelerdeki katkı içerikleri ve ince tanelerdeki değişkenliğe bağlanmıştır [4].

3.2. Sektörde Açığa Çıkan Kullanılmış Döküm Kumu Miktarı (Amount of Used Foundry Sand Exposed in the Sector)

2019 "Aralık ayında açıklanan 53. Dünya Döküm Üretimi istatistiklerine göre, üretim hacmi bakımından, demir ve çelik dökümünde Avrupa'da 2'nci, dünyada 10'uncu; demir dışı metaller dökümünde ise Avrupa'da 3'üncü, dünyada 10'uncu sırada yer almaktadır. Toplam döküm üretiminde ise ülkemiz, Avrupa'nın 3'üncü, dünyanın 11'inci büyük metal döküm üreticisi konumundadır". Türk döküm sektörünün 2019 yılında tam kesinleşmemekle birlikte; toplam üretimi yaklaşık 2.4 milyon tona ulaşmıştır [15]. Döküm sektörü için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın yayımladığı Rehber Doküman'da, 1 ton metal döküm üretiminde 0.2-0.5 ton döküm atığı olduğu ve bu atıkların %65 oranında atık döküm kumlarından kaynaklandığı belirtilmiştir [2]. Bu istatistikî verilere göre, 2019 yılında yaklaşık olarak 480.000 ton-1.200.000 ton arasında döküm atığı olduğu ve bu döküm atıklarından yaklaşık olarak 312.000 ton-780.000 ton arasında WFS olduğu ortaya çıkmaktadır. Dökümhanelerde katı atık yönetimi döküm işlemi akış şeması Şekil 4'te verilmiştir [16].



Şekil 4. Dökümhanelerde katı atık yönetimi döküm işlemi akış şeması [16].

3.3. WFS'nin Yapı Sektöründeki Uygulamaları (Applications of WFS in Construction Industry)

WFS'nin inşaat mühendisliği çalışmalarındaki potansiyel uygulamaları olarak aşağıdaki örnekler verilebilir. Karayolu toprak set dolgusu, akıcı dolgular, yol yapımında, toprak stabilizasyonu ve

güçlendirmesinde, çimento üretiminde hidrolik bariyer veya astar, harç yapımı, kaldırım blokları, tuğla bloklar, asfalt betonu vb. uygulama alanları olarak sayılabilir. WFS'nin geleneksel malzemelere alternatif olarak çeşitli uygulamalarda kullanılması, geleneksel malzemelerin korunmasında, maliyetin düşürülmesinde ve çevre üzerindeki yükün azaltılmasında, dolayısıyla ülke ve çevreden yararlanmada çok yönlü yardımcı olabileceği düşünülmektedir [18],[25].

3.4. WFS'nin Çeşitli Endüstriyel Atık Bazlı GPC'de Kullanımı Üzerine Literatür Araştırması (Literature Research on the Use of WFS in Various Industrial Waste Based GPC)

Bu bölümde, WFS'nin çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de doğal ince agregaya yerine ikame edilerek kullanımının etkisi üzerine çeşitli yazarlar tarafından sınırlı sayıda yapılan çalışma sonuçları verilmiştir.

Bhardwaj ve Kumar (2017), GPC gibi yeni çağ betonlarında WFS kullanımının kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, çeşitli endüstriyel atık malzemelerin ince agregaya, iri agregaya ve çimento yerine kısmi ikame olarak kullanılmasıyla, GPC yapım genel maliyetinin düşebileceği sonucuna varmışlardır [18].

Morale ve ark. (2017) çalışmalarında, GGBFS ve uçucu külün çimento yerine tamamen değiştirilmesi ve ince kumun WFS ile %10, %20 ve %30 oranlarında ikamesi ile üretilen GPC'nin basınç dayanımındaki değişimi araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, betonun 28 günlük basınç mukavemetinin, WFS'nin normal kum ile %20 ikame oranına kadar arttığını ancak bu orandan sonra düşüşe geçtiğini belirlemişlerdir. Sonuç olarak optimum ikame oranını %20 olarak belirlemişlerdir. Bununla birlikte, WFS ile ince agreganın her bir ikame seviyesinde, yaş artışı ile mukavemet artışı gözlemlenmiştir. Ayrıca, WFS ikame oranının artışıyla işlenebilirliğin düştüğünü belirlemişlerdir [26].

Elakyah ve ark. (2019) çalışmalarında uçucu kül ve GGBFS bazlı GPC'de doğal kumun WFS ile %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikamesi ile üretilen GPC'nin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, 8M, 10M ve 12M gibi farklı NaOH molariteleri kullanılmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımlarında elde edilen sonuçlara göre optimum ikame oranını %20 olarak belirlemişlerdir. Hem buharıda hem de ortam koşullarında kür edilen GPC için optimum mukavemet sağlayan alkali sıvının molaritesi 12M olarak belirlenmiştir. Fırında kür edilen GPC ortam koşullarında kür edilen GPC'den daha yüksek dayanıma sahip olmuştur [27].

Sashidhar ve ark. (2016) uçucu kül ve GGBFS bazlı kendiliğinden yerleşen GPC'de doğal kumun yerine WFS kullanılarak üretilen GPC'nin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında dolgu malzemesi olarak F sınıfı uçucu kül / GGBFS oranı (50:50) olacak şekilde kullanılmıştır. NaOH'ın molaritesinin artırılmasıyla artan dayanım ile betonun daha rijit yapıya dönüştüğünü ve doğal kum yerine WFS kullanımının basınç dayanımını arttırdığını ancak yarmada çekme dayanımını azalttığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, 60-70 °C kür sıcaklıklarında daha yüksek dayanımların elde edildiğini belirtmişlerdir [28].

Thaarrini ve ark. (2016), GGBFS ve taban külü ile birlikte WFS'nin doğal kum yerine %50 oranında ikamesinin farklı dayanım sınıflarındaki (M30, M35, M40, M50 ve M55) GPC üretiminde uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada 4M'den 8M'ye kadar düşük konsantrasyonlu NaOH çözeltileri kullanmışlardır. Yoğunluklar, 1800 kg/m³, 2000 kg/m³, 2200 kg/m³ ve 2400 kg/m³ olarak alınmıştır. Taban külü/GGBFS oranı 0, 25, 50, 75 ve 100 olarak belirlenmiştir. Cüruf ilavesinin, jeopolimerizasyon reaksiyonunu arttırdığını ve cüruf miktarı arttıkça, basınç mukavemetinin %50 ikameye kadar arttığını, bu oranın üzerinde azaldığını belirlemişlerdir. WFS'nin normal kum yerine %50 ikame seviyesine kadar eklenmesinin GPC'nin mukavemetini etkilemediğini ancak daha düşük su emme değerlerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Farklı dayanım sınıflarında hazırlanan tüm jeopolimer karışımlarında daha düşük emilim oranları belirlenmiş ve ayrıca beton kalitesindeki artışla emilimin azaldığı bulunmuştur. WFS ilavesi, GPC'nin klorit ve sülfat saldırısına karşı daha iyi direnç gösterdiğini bildirmişlerdir [29].

Namita Patiyal ve ark. (2016) ince agreganın kısmen yerine kullanılan WFS'nin GPC'deki etkinliğini araştırmıştır. WFS ile doğal ince agreganın ikame yüzdeleri ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 olarak hazırlanmıştır. Silika külü-GGBFS esaslı GPC, 80 °C'de fırında kür edilerek erken dayanım kazanmıştır. WFS'nin doğal ince agregaya ile ikamesinde küp numunelerin basınç dayanımlarında optimum oranın %15 olduğu belirlenmiştir. Bu orandaki WFS ikamesi sonucu 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

sırasıyla 20.90 N/mm² ve 28.33 N/mm² olarak elde edilmiştir. Silindir numunelerin eğilme dayanımlarında ise optimum oranın %10 olduğu belirlenmiştir. %10 ikame oranındaki WFS ikamesi sonucu 7 gün ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 5 N/mm² ve 5.83 N/mm² olarak belirlenmiştir [30].

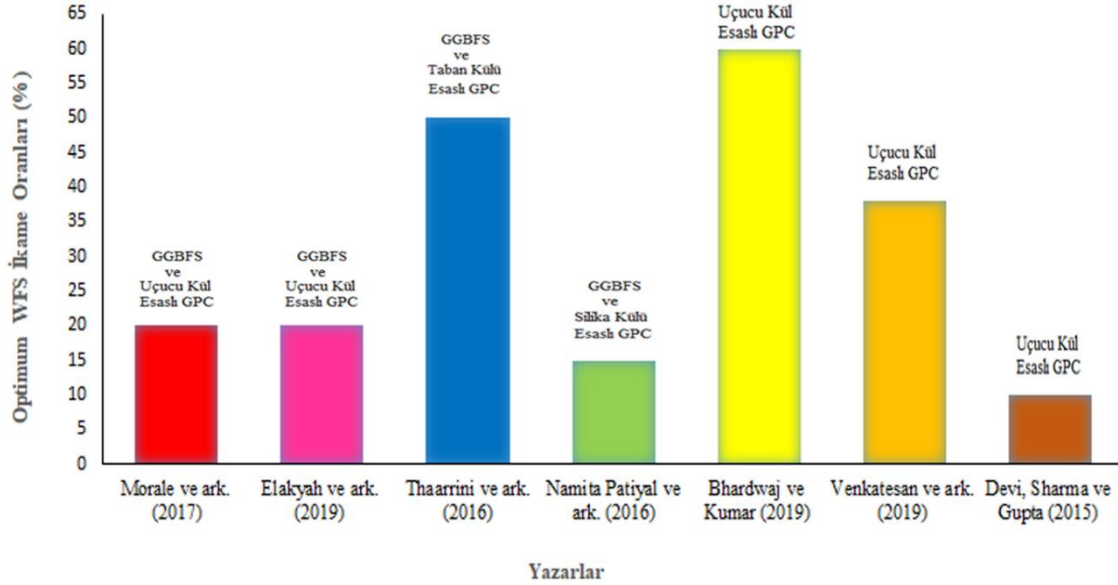
Bhardwaj ve Kumar (2019) çalışmasında, düşük kalsiyumlu uçucu küllü GPC içerisine döküm endüstrilerinden bir yan ürün olan WFS ilavesinin GPC'nin dayanımı (basınç ve yarmada çekme), geçirgenliği ve mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada, %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında WFS doğal kum ile ikame edilmiştir. Sertleşmiş GPC'ler üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kapiler su emme, SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. WFS ilavesinin GPC'nin işlenebilirliğini düşürdüğünü belirlemişlerdir. %60'a kadar WFS ikamesiyle GPC'nin dayanım (basınç, yarmada çekme) değerleri artış gösterirken kılcal geçirimsizliğinin azaldığını belirlemişlerdir. %60 WFS ikamesinde referans betonun (%0 WFS) basınç dayanımından %43 daha fazla dayanım bulunmuştur [31].

Venkatesan ve ark. (2019), GPC sentezlemek için ince agregaların WFS ve uçucu kül proses yan ürünleri ile kısmen ikamesinin etkisini incelemişlerdir. İstenen yüksek basınç dayanımlarını elde etmek için karışım bileşenlerinin (ince agregalar, WFS ve uçucu kül) oranını yönlendirmek için deneylerin D-optimal karışım tasarımını benimsemişlerdir. WFS ve uçucu kül kullanımını maksimuma çıkarmak için optimizasyon yapmışlar ve karışım içerisindeki (ince agregalar + WFS + uçucu kül) ince agregaların sadece ağırlıkça %32 katkısıyla (WFS %38; uçucu kül %30) 7 günlük dayanımda 18.9 N/mm² ve 28 günlük dayanımda 22.3 N/mm² değerini veren bir tarif belirlemişlerdir [32].

Devi, Sharma, ve Gupta, (2015) çalışmalarında, uçucu kül (başka hiçbir katı madde kullanılmamıştır) ile yüksek oranda NaOH, Na₂SiO₃ gibi alkalin çözeltilerinden oluşan ve GPC'nin üzerindeki etkisini görmek için %10, %20 ve %30 oranlarında WFS'yi doğal ince agrega yerine ikame ederek ürettikleri M40 dayanım sınıfındaki GPC'nin farklı kürlenme koşullarındaki (ortam kürü, 60 °C ve 90 °C) 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarını incelemişlerdir. Kür sıcaklığının ve kür süresinin artışıyla dayanımın da arttığını belirlemişlerdir. Tüm kürleştirme şartlarında 28 günlük eğilme dayanımlarda en yüksek dayanımlar %10 WFS ikamesiyle elde edilmiş ve ayrıca ortam sıcaklığındaki kür şartlarında %30 WFS ikame oranına kadar dayanımın artış gösterdiği belirlenmiştir [33].

Apithanyasai, ve ark. (2020) çalışmalarında jeopolimer tuğla üretimi için WFS, uçucu kül ve elektrik ark ocağı cürufunun (EAF cürufu) optimum karışım oranını araştırmışlardır. Çalışmalarında WFS, uçucu kül ve EAF cürufunu 70:30:0, 60:30:10, 50:30:20 ve 40:30:30 oranlarında 8M sodyum hidroksit (NaOH) çözeltilisi ile karıştırmışlardır. Na₂SiO₃/NaOH oranı 2.5 olacak şekilde kullanılmıştır. Karışımlar 5cm x 5cm x 5cm kalıplarda sıkıştırılmış ve 28 gün çevre sıcaklığında kürlenmiş ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, en yüksek basınç dayanımına sahip jeopolimer tuğlaların, 25.76 MPa basınç dayanımı ile %40 WFS'nin kullanıldığı 40:30:30 oranındaki karışımlar olarak belirlenmiştir [34].

Doğan-Sağlamtimur (2018) çalışmasında, dökümhane sektöründe WFS sorununa bir çözüm getirmek ve yeniden kullanılmasını sağlamak için, tamamen WFS atıkları kullanarak jeopolimer yapı malzemesi (çimentosuz bir teknoloji olarak) üretmiş ve bu malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Deney adımının ilk bölümünde elek analizi, gevşek/sıkı birim ağırlık ve WFS'nin yanma kaybı testleri gerçekleştirmiştir. İkinci aşamada, kimyasal bağlayıcılarla (NaOH ve Na₂SiO₃) aktive edilen WFS bazlı jeopolimer numuneleri üzerinde su emme yüzdesi, porozite, birim ağırlık ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirmiştir. Üretilen tüm numunelerin birim ağırlıkları 1.6 g/cm³ 'ten düşük olmuştur. WFS atıklarını jeopolimer üretiminde hammadde olarak kullanan çalışmada uygulanan yöntemde, WFS içerisine farklı oranlarda (ağırlık/ağırlık bazında) eklenen kimyasal bağlayıcıların optimum miktarları NaOH için %10 (kür sıcaklığı 100 °C) ve Na₂SiO₃ için %30 (kür sıcaklığı 200 °C) olarak belirlenmiştir. Duvar yapı malzemeleri için minimum basınç dayanımı değeri ulusal standartlara göre 2.5 MPa olarak kabul edilirken çalışmada, 200 °C'lik kürleme sıcaklığında %30 Na₂SiO₃ karışımının dahil edilmesi ile 28 günlük maksimum basınç dayanımı değeri, 12.3 MPa olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak jeopolimer malzemenin bir yapı duvarı malzemesi olarak kullanılmaya uygun olduğu sonucuna varmıştır [35]. Çeşitli endüstriyel atıklar kullanılarak üretilen GPC'de farklı yazarlar tarafından bulunan optimum WFS ikame oranları Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Çeşitli endüstriyel atıklar kullanılarak üretilen GPC'de farklı yazarlar tarafından bulunan optimum WFS ikame oranları.

Şekil 5 incelendiğinde, çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'nin basınç dayanımlarının belirlenmesinde farklı WFS optimum ikame oranlarının belirlendiği görülmüştür. Morale ve ark. (2017) ve Elakyah ve ark. (2019), GGBFS ve uçucu kül bazlı WFS ikameli GPC'de optimum WFS ikame oranını %20, Thaarrini ve ark. (2016), GGBFS ve taban külü bazlı GPC'de %50, Namita Patiylal ve ark. (2016), GGBFS ve silika külü bazlı GPC'de %15 olarak belirlerken, sadece uçucu kül bazlı GPC'de optimum WFS ikame oranlarını Bhardwaj ve Kumar (2019) %60, Venkatesan ve ark. (2019) %40 ve Sharma ve Gupta, (2015) %10 olarak belirlemişlerdir.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS and RECOMMENDATIONS)

Bu araştırmanın esasını teşkil eden; WFS'nin çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de doğal ince agrega yerine ikame edilerek kullanımının etkisi üzerine sınırlı sayıda çalışmanın yapıldığı ve bu alanda literatürde ciddi oranda bir boşluk olduğu belirlenmiştir. WFS ikameli GPC'de çeşitli endüstriyel atıkların kullanımına yönelik araştırma bulguları aşağıda verilmiştir.

- WFS ikamesinin GPC yapım genel maliyetini düşüreceği sonucuna varılmıştır.
- WFS ikame artışının GPC'nin işlenebilirliğini düşürdüğü rapor edilmiştir.
- WFS'nin normal kum yerine ikamesiyle GPC'nin daha düşük su emme değerlerine ve daha düşük kılcal geçirimsizliğe sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de WFS'nin doğal kum ile ikame edilerek kullanımıyla üretilen GPC'lerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde farklı WFS optimum ikame oranlarının belirlendiği görülmüştür. GPC üretiminde kullanılan endüstriyel atıkların türü ve oranları, kullanılan bileşenlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kür sıcaklığı ve kür süreleri, kullanılan aktivatör türü, alkali konsantrasyonunun rolü ve alkali oranları vb. özelliklerin çeşitliliğinden dolayı farklı WFS optimum ikame oranlarının elde edildiği düşünülmektedir.
- WFS ilavesiyle üretilen GPC'nin geleneksel betona göre asit ve sülfat saldırısına karşı daha iyi direnç gösterdiği bildirilmiştir.

Sonuç olarak, araştırma konusu olan WFS'nin doğal kum yerine ikame edilerek çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de kullanımına yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma olduğu ve bu çalışmalarda daha çok mekanik özellikler üzerine yoğunlaşıldığı ve en çok basınç dayanımının incelendiği belirlenmiştir. Bu alanda literatürde henüz yeterince araştırılmamış konular üzerinde yapılacak disiplinler arası çalışmalarla farklı

oranlarda WFS ikameli GPC'lerin fiziksel (donma-çözülme, termal iletkenlik, TGA vb.), kimyasal (FT-IR vb.), mekanik (darbe testi, sertlik vb.), durabilite ve mikro yapı incelemeleri, radyolojik vb. özelliklerin kapsamlı bir şekilde araştırılmasının birçok yönden literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmalar sonucunda elde edilecek bilgi, birikim ve deneyimlerden yararlanarak WFS ikameli ve endüstriyel atık bazlı GPC'nin kullanım alanlarının genişletilmesi, mukavemetinin artırılması, maliyetin azaltılması, GPC üretimi için potansiyel sürdürülebilir bir kaynak sağlanması, atıkların değerlendirilerek bertarafın ve bertaraf maliyetinin azaltılması, doğal kaynakların korunması ve çimentonun CO₂ salınımı nedeniyle çevre kirliliğine sebep olan olumsuz etkisinin en aza indirilmesi yönünde çok büyük bir kazanç elde edileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Siddique R, Singh G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resour Conserv Recycl* 2011;55:885–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>.
- [2] Yalılı K.M, Tüylü M. Atık Döküm Kumları İçin Uygun Bertaraf Yönteminin Maliyet Analizi ile Belirlenmesi: Bursa Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Derg* 2019;90:1–10. <https://doi.org/10.21324/dacd.490558>.
- [3] Kumar Patel BB, Kumar Pitroda J. A Review of Geo Polymer Concrete by Using Various Industrial Waste Materials. *Int J Constr Res Civ Eng* 2017;3:121–31. <https://doi.org/10.20431/2454-8693.0304011>.
- [4] Okenyi V. Strength Properties of Concrete Produced With Foundry Sand as Fine Aggregate Replacement 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29829.91367/1>.
- [5] Davidovits J. Properties of Geopolymer Cements. *First Int Conf Alkaline Cem Concr* 1994:131–49.
- [6] Jian, He. Synthesis and characterization of geopolymers for infrastructural applications ,Louisiana State University LSU Digital Commons 2012.
- [7] Singh B, Ishwarya G, Gupta M, Bhattacharyya SK. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Constr Build Mater* 2015;85:78–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>.
- [8] Hadi MNS, Al-Azzawi M, Yu T. Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. *Constr Build Mater* 2018;175:41–54. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.092>.
- [9] Li C, Sun H, Li L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. *Cem Concr Res* 2010;40:1341–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>.
- [10] Yusuf TO, Ismail M, Usman J, Noruzman AH. Impact of Blending on Strength Distribution of Ambient Cured Metakaolin and Palm Oil Fuel Ash Based Geopolymer Mortar. *Adv Civ Eng* 2014;2014. <https://doi.org/10.1155/2014/658067>.
- [11] Ganesan N, Abraham R, Deepa Raj S, Sasi D. Fracture properties of geopolymer concrete. *Asian J Civ Eng* 2015;16:127–34.
- [12] Provis JL. Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? *Mater Struct Constr* 2014;47:11–25. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5>.
- [13] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Van Deventer JSJ. Geopolymer technology: The current state of the art. *J Mater Sci* 2007;42:2917–33. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
- [14] İSO 500 | Türkiye'nin 500 Büyük Sanayi Kuruluşu n.d. <http://www.iso500.org.tr/500-buyuk-sanayi-kurulusu/2018/> (Erişim tarihi: 09.06.2020).

- [15] TÜRKDÖKÜM Dergisi, Sayı 54, 2020, https://tudoksad.org.tr/upload/files/T%C3%BCrkd%C3%B6k%C3%BCm_Sayi_54.pdf (Erişim tarihi: 09.06.2020).
- [16] Dökümhanelerden Kaynaklanan Tehlikeli Katı Atıkların Yönetimi. Eckart Schultes - PDF Free Download n.d. <https://docplayer.biz.tr/2791654-Dokumhanelerden-kaynaklanan-tehlikeli-kati-atiklarin-yonetimi-eckart-schultes.html> (Erişim tarihi: 09.06.2020).
- [17] Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği. Türkiye Döküm Sektörü, Kullanılmış Döküm Kumunun Değerlendirilmesi ve Geri Kazanımı, 2019. http://www.tudoksad.org.tr/upload/files/TUDOKSAD_Dokum_Kumu_Geri_Kazanimi_Raporu_F%20%282%29%20%283%29.pdf, (Erişim tarihi: 09.06.2020).
- [18] Bhardwaj B, Kumar P. Waste foundry sand in concrete: A review. *Constr Build Mater* 2017;156:661–74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010>.
- [19] Naik TR. Foundry Industry By-Products Utilization. University of Wisconsin-Milwaukee, Department of Civil Engineering and Mechanics, Center for By-Products Utilization, Report No. CBU-1989-01, 1989.
- [20] Dayton EA, Whitacre SD, Dungan RS, Basta NT. Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactured soils. *Plant Soil* 2010;329:27–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0120-0>.
- [21] Ellis JMK and DJ. Mechanical Properties of Concrete Containing Foundry Sand. *Spec Publ* n.d.;200. <https://doi.org/10.14359/10612>.
- [22] Aggarwal Y, Siddique R. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. *Constr Build Mater* 2014;54:210–23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051>.
- [23] Naik TR, Kraus RN, Ramme BW, Canpolat F. Effects of fly ash and foundry sand on performance of architectural precast concrete. *J Mater Civ Eng* 2012;24:851–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000432](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000432).
- [24] Javed S, Lovell CW, Wood LE. Waste foundry sand in asphalt concrete. *Transp Res Rec* 1994;27–34.
- [25] Fiore S, Zanetti MC. Foundry wastes reuse and recycling in concrete production. *Am J Environ Sci* 2007;3:135–42. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2007.135.142>.
- [26] Morale A, Chaurasiya D, Jaiswal AP. Effective Utilization of Foundry Sand and Ground Granulated Blast Furnace Slag in Geopolymer. *Asian J Convergen Tecnol* 2015;III:1–7.
- [27] Elakyah D, Kalaivani M, Easwaran P. Effect of Curing and Molarity on Geopolymer Concrete With Foundry Sand 2019;7:203–8.
- [28] Sashidhar, C., GURU, J. J., Neelima, C., & PAVAN, K. D. Preliminary Studies on self compacting geopolymer concrete using manufactured sand, 2016.
- [29] Thaarrini J, Ramasamy V. Properties of foundry sand, ground granulated blast furnace slag and bottom ash based geopolymers under ambient conditions. *Period Polytech Civ Eng* 2016;60:159–68. <https://doi.org/10.3311/PPci.8014>.
- [30] Patiyal N, Kumar J, Sharma AK. Experimental Study on Geopolymer Concrete with Partial Replacement of Fine Aggregate with Foundry Sand. vol. 3. 2016.

- [31] Bhardwaj B, Kumar P. Comparative study of geopolymer and alkali activated slag concrete comprising waste foundry sand. *Constr Build Mater* 2019;209:555–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.107>.
- [32] Venkatesan M, Zaib Q, Shah IH, Park HS. Optimum utilization of waste foundry sand and fly ash for geopolymer concrete synthesis using D-optimal mixture design of experiments. *Resour Conserv Recycl* 2019;148:114–23. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.008>.
- [33] Devi R, Sharma SK, Gupta H. Effect of Different Curing Conditions on Geopolymer Concrete By Partially Replacing Sand With Foundry Sand. *J Today'S Ideas - Tomorrow'S Technol* 2015;3:123–8. <https://doi.org/10.15415/jotitt.2015.32008>.
- [34] Apithanyasai S, Supakata N, Papong S. The potential of industrial waste: using foundry sand with fly ash and electric arc furnace slag for geopolymer brick production. *Heliyon* 2020;6:e03697. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03697>.
- [35] Doğan-Sağlamtimur N. Waste Foundry Sand Usage for Building Material Production: A First Geopolymer Record in Material Reuse. *Adv Civ Eng* 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1927135>.