



Atık Döküm Kumunun Geoteknik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Müge Balkaya^{1*}

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

E-Posta: balkayamu@itu.edu.tr

Gönderim 29.10.2021; Kabul 29.03.2022

Özet: Atık döküm kumu, metal döküm endüstrisinde ortaya çıkan ve büyük miktarlara ulaşan bir yan üründür. Döküm işlemi sırasında bünyesine aldığı metaller ve buna bağlı çevresel kaygılar nedeniyle bu malzeme genellikle atık olarak kabul edilmekte ve düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilmektedir. Ancak, uygun mühendislik özellikleri nedeniyle atık döküm kumları inşaat mühendisliği alanında, özellikle büyük miktarlarda malzeme kullanımının gerekli olduğu çeşitli geoteknik uygulamalarında yeniden kullanılabilir. Bu çalışmada, atık döküm kumları hakkında genel bilgiler verilmiş ve bertaraf yöntemleri, çevresel etkileri, geoteknik özellikleri ve inşaat mühendisliği ve geoteknik uygulamalarında faydalı kullanım alanları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık döküm kumu, inşaat mühendisliği, geoteknik mühendisliği, geri dönüşüm, faydalı kullanım

Use of Waste Foundry Sand in Geotechnical Engineering Applications

Received 29.10.2021; Accepted 29.03.2022

Abstract: Waste foundry sand is a by-product of the metal casting industry that reaches large quantities. Due to the metals it contains during the casting process and the associated environmental concerns, this material is generally considered as waste and disposed of in landfills. However, due to its favourable engineering properties, waste foundry sands can be reused in civil engineering field, especially in various geotechnical applications where the use of large quantities of material is required. In this study, general information about waste foundry sands is given and their disposal methods, environmental effects, geotechnical properties and areas of beneficial reuse in civil engineering and geotechnical applications are examined.

Key Words: Waste foundry sand, civil engineering, geotechnical engineering, recycle, beneficial reuse

GİRİŞ

Demir-çelik, makine, otomotiv, metalürji, inşaat gibi çeşitli endüstri dallarında kullanılan metal döküm ürünlerinin kalıplanmasında genellikle döküm kumu kullanılmaktadır. Kum kalıplara sıvı halde dökülen ergitilmiş metaller kalıp içerisinde soğutularak istenilen şekli alması sağlanır. Kalıplama işleminde birkaç kez kullanılabilen döküm kumları, döküm işlemi sırasında maruz kaldıkları yüksek sıcaklık ve mekanik aşınmaya bağlı olarak zamanla incelmekte ve belli bir kullanımdan sonra atık haline gelmektedir [1]. Metal döküm endüstrilerinde belirli bir kullanımdan sonra atılan kuma atık döküm kumu adı verilir [2].

Metal döküm işlemi sırasında kumun bir arada durmasını sağlamak amacıyla genellikle iki tür bağlayıcı madde kullanılır. Kullanılan bağlayıcı maddenin türüne göre döküm kumları kil bağlayıcılı kum (yeşil kum) ve yüksek sıcaklık işlemleri için kullanılan kimyasal bağlayıcılı kum olarak sınıflandırılır [3-4]. Kil bağlayıcılı (yeşil) kumlar, yüksek kaliteli silika kumu (%85-95), bağlayıcı olarak bentonit kili (%4-10), döküm yüzey finişi iyileştirmek için karbonlu bir katkı maddesi (%2-10) ve su (%2-5) gibi birlikte harmanlanmış doğal malzemelerden meydana gelir. Renkleri karbon içeriği nedeniyle siyahtır [5, 6]. Yeşil kum, dökümhaneler tarafından en yaygın olarak kullanılan kalıplama kumudur. Silis kumu döküm sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklara direnirken, kil kaplama kum danelerini birbirine bağlar. Döküm kumunun içeriğindeki su malzemeye plastisite katar. Karbonlu katkı maddeleri ise döküm yüzeyinde kumun yanmasını veya döküm yapılan malzemeye kaynaşmasını önler. Yeşil kum ayrıca MgO, K₂O ve TiO₂ gibi eser kimyasallar içerir. Kimyasal bağlayıcılı kumlar ise, hem ergimiş metalin ısısına dayanmak için yüksek mukavemetin gerekli olduğu maça yapımında, hem de kalıp yapımında kullanılır [5]. Bu tür kumlarda katalizörler ile birlikte bir veya birden fazla organik bağlayıcı maddenin birlikte kullanımını söz konusudur. Kimyasal bağlayıcılı kumlar, %93-99 silika ve

* İlgili E-posta/ Corresponding E-mail: balkayamu@itu.edu.tr, Orcid: 0000-0002-9509-1675

%1-3 kimyasal bağlayıcıdan oluşur ve kil bağlayıcı kumlara göre genellikle daha açık renklidirler [5-6].

Döküm endüstrisinde üretim sonucunda büyük miktarlarda ortaya çıkan atık döküm kumları genellikle düzenli depolama tesislerinde depolanmaktadır. Ancak düzenli depolama tesislerinin sınırlı kapasitesi, bertaraf işleminin maliyeti, çevreye etkileri gibi nedenlere atık döküm kumları ciddi problemlere yol açmaktadır. Döküm işleminde kullanımı sonucunda döküm kumlarının bazı özellikleri değişme göstermekle birlikte, çeşitli yeni ürünlerin hammaddesi olarak kullanılabilen ve özellikle inşaat sektöründe farklı uygulamalarda büyük miktarlarda yeniden kullanım alanı bulabilmektedir. Bu sayede doğal kaynakların korunması, ülke ekonomisine fayda sağlanması, atık maddelerin azaltılması ve depolanmasına bağlı oluşabilecek çevresel sorunların önüne geçilmesi mümkün olabilmektedir. Bu nedenle, diğer bazı atık malzemelerde olduğu gibi atık döküm kumlarının çeşitli amaçlarla yeniden kullanımını da önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, atık döküm kumları hakkında genel bilgiler verilmiş ve bertaraf yöntemleri, çevresel etkileri, geoteknik özellikleri ve inşaat mühendisliği ve geoteknik uygulamalarında faydalı kullanım alanları incelenmiştir.

ATIK DÖKÜM KUMUNUN BERTARAF YÖNTEMLERİ

Atık döküm kumları üzerinde yapılan çeşitli çalışmalarda bir ton metal döküm sonucunda yaklaşık 0.60-1.0 ton atık döküm kumu ortaya çıktığı ve dünya çapında atık döküm kumu üretiminin 2018 yılı verilerine göre yaklaşık 62.64 milyon ton olduğunu belirtmiştir [7-8]. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Türk döküm sektörüne ilişkin yayınladığı sektörel atık kılavuzunda [9] ise, ülkemizde bir ton metal döküm malzemesi üretiminde 4-5 ton kum kullanıldığı, bu işlem sonucunda yaklaşık olarak 0.6-0.8 ton atık oluştuğu ve bu atıkların 0.4-0.6 ton kadarını kullanılmış kumların oluşturduğu bildirilmiştir. Bu miktarlar dökülen metalin cinsi, parça büyüklüğü ve kalıplama için kullanılan teknik gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. 2007 yılı üretim rakamlarına göre Türk döküm sektöründe 1.294.500 ton üretim yapılmış ve bu üretim sonucunda 450.000 ton civarında atık ortaya çıkmıştır. Bu atıkların yaklaşık %65'i kum, %10'u cüruf, %15'i toz-çamur ve %10'u refrakter, yağ, taş, boya, varil gibi atıklardan meydana gelmiştir [9]. 2016 yılı verilerine göre ise üretim hacmi 1.898.500 ton'a ulaşmıştır [10]. Üretimde gözlenen artış, ortaya çıkan atık miktarının da artmasına yol açmaktadır. Buna bağlı olarak da, bu malzemelerin çevreye en az zarar verecek şekilde bertaraf edilmesi konusu tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de önemli bir sorun olmaktadır.

Kum nispeten ucuz bir malzemedir. Ancak, atık döküm kumlarının bertarafı düşünüldüğünde maliyetler oldukça artmaktadır. Sharma ve Reddy [11], 8000 ton kullanılmış kumun düzgün biçimde bertaraf edilmesinin \$680.000 tutabildiğini belirtmiştir. Bununla beraber, atığın sızıntı suyu metal konsantrasyonları (As, Ag, Ba, Cd, Cr, Ni, Zn, Cu, Pb, Hg, Se) müsaade edilen sınır değerleri aşarsa, atık madde tehlikeli atık olarak kabul edilir. Bu durumda atıkların tehlikeli atıklar için özel tasarlanmış düzenli depolama tesislerine atılması gerekir ki bu da maliyeti önemli ölçüde artırır [11]. Bu nedenler göz önünde bulundurulduğunda, atık döküm kumlarının düzenli depolama tesislerine atılmak yerine geri dönüşüm malzemesi olarak değerlendirilmesinin pek çok açıdan faydalı olacağı açıktır. Ancak, bu yüksek maliyete rağmen dünya genelinde ortaya çıkan atık döküm kumlarının %90'dan fazlası geri dönüştürülmeyip düzenli depolama tesislerinde depolanmakta [12-17], yalnızca %10 civarında ADK ise çeşitli uygulamalar için geri dönüştürülmektedir [18].

ATIK DÖKÜM KUMUNUN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Döküm işleminden önce dökümhane kumları çoğunlukla temiz kabul edilir. Ancak, döküm işlemi sırasında yüksek sıcaklıklarda eriyik metallere maruz kaldıkları için bu işlem sırasında ağır metaller ve çeşitli kirleticiler atık döküm kumunun bünyesine girebilir [11,19]. Bu nedenle, üretimde kullanıldıktan sonra atık döküm kumları çevre açısından tehlikeli hale gelebilir [6].

Yeniden kullanımları sonucu ortaya çıkabilecek olası çevresel etkiler ve buna bağlı çeşitli endişeler nedeniyle atık döküm kumlarının faydalı kullanımı halen çok yaygın bir uygulama değildir [14]. Atık döküm kumlarının faydalı kullanımı ile ilgili endişelerin başında toksik maddelerin ortama sızma ihtimali bulunmaktadır [5]. Atık döküm kumlarının çevresel etkilerini belirlemek amacıyla son yıllarda çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Atık döküm kumlarından gelen sızıntı suyunun değerlendirilmesi üzerine yapılan bazı çalışmalarda, atık döküm kumu numunelerinde güvenli sınırları aşan kirletici konsantrasyonlarını bildirilmekle birlikte [20], çoğu çalışmada tehlikeli madde konsantrasyonunun

güvenli sınırların altında olduğu ve atık döküm kumlarının çevreye zarar vermeden kullanılabilmesi belirtilmiştir [21-28]. Çeşitli araştırmacılar atık döküm kumlarının çevresel risk teşkil etmeden yapısal dolgularda ve yol dolgularında kullanımının uygun olduğunu belirtmiştir [18, 29]. Literatürde değerlendirilen atık döküm kumlarının çoğunluğu çevresel gereklilikleri karşılansa da, kullanılması amaçlanan atık döküm kumları için sızıntı suyu analizi yapılması, malzemenin çevresel etkilerini ve toksisitesini belirlemek ve yeniden kullanımının çevre açısından uygunluğunu değerlendirmek amacıyla tavsiye edilmektedir [30, 31].

ATIK DÖKÜM KUMUNUN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

Atık döküm kumları, plastik özellik göstermeyen, 0.075 mm'den küçük malzeme yüzdesi genellikle %5-12 arasında olan, dane çapı dağılımı üniform, dane şekli tipik olarak yuvarlak-yarı köşeli arasında olan kumlardır [11, 32]. Atık döküm kumlarının geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda özgül ağırlıklarının (G) 2.39-2.79, optimum su muhtevalarının (wopt) %9-16.4, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının (γkmaks) 14.3-19.1 kN/m³, permeabilite katsayılarının (k) 9x10⁻¹¹-1x10⁻⁵ m/s, efektif kayma mukavemeti açılarının (φ') 28.4°-43.0°, kohezyon değerlerinin (c') 0-31 kPa, CBR değerlerinin ise %10.9-51.0 aralıklarında değiştiği belirtilmiştir [18, 23, 26, 29, 33-40]. Atık döküm kumlarının geoteknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Kaynak	G (-)	wopt (%)	γkmaks (kN/m ³)	k (m/s)	φ' (°)	c' (kPa)	CBR (%)
[18]	2.59	12.5	17.5		28.4-31.8	0	
[23]	2.79						
[29]				1x10 ⁻⁸ – 7x10 ⁻⁷	38		
[33]	2.53-2.57	11.9-14.8	17.4-18.4				
[34]	2.59	16.4	16.4	9x10 ⁻¹⁰	37	15	
[35]	2.62	16	16.7	1x10 ⁻⁵	31.1	8.6	
[36]	2.51-2.76	9.6-15.0	17.2-18.8		39-43	17-28	
[37]	2.52-2.73	9.6-13.8	16.9-18.8				
[40]	2.61	9.0-11.3	18.3-19.1		32.5-39.2	18-31	12-51.2
[41]	2.53	15.5	14.3	1x10 ⁻⁸ – 7x10 ⁻⁷	35-38		17-18
[42]	2.39-2.55			1x10 ⁻⁵ – 1x10 ⁻⁸	33-40		
[43]	2.51-2.62	10.8-12.3	16.5-18.6	9x10 ⁻¹¹ - 5.3x10 ⁻⁷			

Atık döküm kumları, doğal kuma oranla daha düşük birim hacim ağırlık ve hidrolik iletkenlik, daha yüksek su emme, sıkışabilirlik ve boşluk oranına sahip malzemelerdir [6, 15, 34, 44]. Hidrofilik özellik gösteren atık döküm kumları, yüksek silika bileşimi nedeniyle yüzeyine oldukça fazla su çekerler [5, 45]. Geçirgenliği doğal kumdan daha düşük olduğundan serbest drenajlı bir malzeme olarak kabul edilmezler [11, 41]. Bu özellikleri nedeniyle düzenli depolama tesislerinde örtü tabakası, kaplama tabakası ve toprak dolgu baraj çekirdekleri gibi düşük geçirgenliğin gerekli olduğu uygulamalar için uygun bir malzeme olabilmektedirler [46].

Atık döküm kumlarının sıkışabilirliği, uygulanan gerilmeye ve zamana bağlıdır ve içeriğinde bulunan bentonit ve ince danelerin miktarı ve bu malzemelerin sıkışması, bu davranışı önemli ölçüde etkilemektedir [34, 37, 47]. Bu nedenle deformasyona uğrama davranışı saf kumdan önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Dolayısıyla, atık döküm kumlarının sıkışabilirliği hususunda bir belirsizlik mevcuttur. Bu özelliği, büyük miktarlarda atık döküm kumu kullanımının dezavantajlarından biri olarak kabul edilmektedir [42]. Atık döküm kumu içeriğindeki ince dane miktarı, sıkışabilirlik özelliğinin yanı sıra malzemenin mukavemet ve hidrolik iletkenlik özelliklerini de büyük oranda etkilemektedir [29].

ATIK DÖKÜM KUMUNUN FAYDALI KULLANIM ALANLARI

Atık döküm kumlarının büyük bir kısmı düzenli depolama tesislerine atılmaktadır. Ancak, son yıllarda düzenli depolama tesislerinin sınırlı kapasitesini korumak, bertaraf maliyetlerinden tasarruf etmek, doğal malzemelerin tüketimini ve karbon ayak izini azaltmak ve doğal malzeme kullanımına ekonomik bir alternatif sunmak amacıyla atık döküm kumlarının çeşitli alanlarda yeniden kullanımı gündeme gelmiştir.

Atık döküm kumlarının özellikle inşaat mühendisliği alanında geoteknik uygulamalar, yol inşaatı uygulamaları ve yapı malzemesi üretimi gibi alanlarda yeniden kullanımı çok büyük miktarlarda atığın geri kazanımını sağlayabilir. Bu nedenle, çok sayıda araştırmacı atık döküm kumlarının mekanik özelliklerini belirlemek ve çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanım açısından uygunluğunu değerlendirmek amacıyla çalışmalar yapmıştır [33-37, 40-43].

Atık döküm kumları, pek çok açıdan doğal kuma benzer özellikleri nedeniyle çeşitli inşaat ve geoteknik uygulamalarda özellikle agrega ikamesi için etkin bir şekilde kullanılabilir. Atık döküm kumları asfalt betonunda [15, 31, 48, 49] ve sıcak karışım asfaltta ince agrega yerine [31, 50, 51]; yol inşaatlarında, dolgularda ve istinat yapılarında [14, 19, 26, 28, 29, 36, 37, 44, 52-58]; hidrolik bariyer veya örtü tabakası olarak [36, 38, 43, 58, 59]; dolgularda ve boru yataklarında [26]; ve çimento, beton, akıcı dolgu, tuğla, blok ve parke taşı gibi yapı malzemelerinin imalatında [13, 25, 31, 49, 60-71] kullanılabilirler.

SONUÇLAR

Metal döküm ürünlerin kalıplanması sonucunda ortaya çıkan atık döküm kumları, üretimdeki artışa bağlı olarak her geçen gün artmaktadır. Bu durum, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de bertaraf problemini beraberinde getirmektedir. Atık olarak düşünüldüğünde düzenli depolama tesislerinde depolanarak ilave maliyet ve çeşitli çevre sorunlarına neden olabilen atık döküm kumları pek çok mühendislik özelliği nedeniyle geri dönüşüme uygun malzemelerdir. Bu nedenle, büyük hacimlerde malzemenin kullanım alanı bulunduğu inşaat sektörü, özellikle geoteknik mühendisliği uygulamaları, atık döküm kumlarının yeniden kullanımı açısından oldukça uygun bir alandır.

Kum inşaat mühendisliğinin pek çok alanında hâlihazırda kullanılan doğal bir malzemedir. Döküm işleminde birkaç kez kullanılması sonucunda atık olarak adlandırılan atık döküm kumlarının bazı özellikleri değişmekle birlikte pek çok açıdan doğal kumun kullanıldığı çeşitli uygulamalarda kullanımının uygun olabileceği pek çok araştırmacı tarafından belirtilmektedir. Bununla beraber, döküm işlemi sırasında yüksek sıcaklıklardaki eriyik metallere maruz kalmaları sonucunda ağır metaller ve çeşitli kirleticiler ihtiva etmeleri ve bu kirleticilerin sızıntı yoluyla çevreye yayılması ihtimali çevre açısından endişelere yol açmaktadır. Yapılan çalışmalarda bazı istisnai durumlar haricinde atık döküm kumlarının çevre açısından sorun teşkil etmeyeceği belirtilmiştir. Ancak yine de atık döküm kumlarının yeniden kullanımının söz konusu olduğu durumlarda sızıntı suyu analizlerinin yapılması, malzemenin çevre açısından uygunluğunun belirlenmesi amacıyla tavsiye edilmektedir.

Atık döküm kumları düzenli depolama tesislerinde örtü tabakası, kaplama tabakası ve toprak dolgu baraj çekirdekleri, yol dolguları, istinat yapıları ve boru hatlarında geri dolgu ve çeşitli yapı malzemelerinin üretiminde kullanılabilir. Bu malzemelerin faydalı kullanımı, sınırlı kaynaklara sahip hammaddelerin kullanımının azaltılması, depolama tesislerinde büyük alanlar işgal edilmesinin önlenmesi, depolanma sırasında çeşitli çevresel düzenlemelere uyulması gerekliliğinin ortadan kalkması, depolanmaya bağlı olarak doğabilecek çevre kirliliği sorununun önüne geçilmesi (sızıntı suyu vb.) ve ilave maliyet getirecek taşıma masraflarının ortadan kaldırılması, dolayısıyla da ülke ekonomisine getireceği katkılar nedeniyle teşvik edilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Clean Washington Center, 1995, Beneficial reuse of spent foundry sand (IBP-95-1). Recycling Technology Assistance Partnership (ReTAP), Seattle, Washington..
- [2] Bhardwaj, B., Kumar, P., 2017, Waste foundry sand in concrete: a review, Constr. Mater. Build. Vol.156, 661–674
- [3] Beeley, P. 2001. Foundry technology, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Boston, Massachusetts
- [4] Clegg, A.J. 1991, Precision casting processes, 1st Edition, Pergamon Press, New York.

- [5] Tittarelli, F., 2018, Waste Foundry Sand, In: Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete Characterization, Properties and Applications, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 121-147.
- [6] Siddique, R., Kaur, G., Rajor, A., 2010, Waste foundry sand and Its Leachate Characteristics, Resour. Conserv. Recycl., Vol. 54(12), 1027-1036.
- [7] P.P.O.L. Dyer, M.G.D. Lima, L.M.G. Klinsky, S.A. Silva, G.J.L. Coppio, 2018, Environmental Characterization of Foundry Waste Sand (WFS) in Hot Mix Asphalt (HMA) Mixtures, Constr. Build. Mater., Vol. 171, 474-484.
- [8] Zanetti, M., Godio, A., 2006, Recovery of Foundry Sands and Iron Fractions from an Industrial Waste Landfill, Resour. Conserv. Recycl., Vol. 48(4), 396-411.
- [9] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Sektörel Atık Kılavuzları, Döküm Sektörü, web sayfası: https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Dokum_Sektoru_Kilavuzu.pdf, erişim tarihi: 05/07/2021.
- [10] Tüdoksad, 2017, Türkiye Sanayicileri Derneği, Türk Döküm Dergisi 45.
- [11] Sharma, H.D., Reddy, K.R., 2004, Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies, 1st Edition, John Wiley & Sons.
- [12] Dyer, P.P.O.L., Klinsky, L.M.G., Silva, S.A., e Silva, R.A., de Lima, M.G., 2019, Macro and Microstructural Characterization of Waste Foundry Sand Reused as Aggregate, Road Mater. Pavement Des., Vol. 22(2), 464-477.
- [13] Mynuddin, S.A., Mohan, M., I. Reddy, Reddy, N.P., 2018, Strength Behaviour of Concrete Produced with Foundry Sand as Fine Aggregate Replacement, Int. J. Technol. Res. Eng., Vol. 5, 3476–3480.
- [14] Gedik, A., Lav, A.H., Lav, M.A., 2018, Investigation of alternative ways for Recycling Waste Foundry Sand: An Extensive Review to Present Benefits, Can. J. Civ. Eng., Vol. 45, 423-434.
- [15] Bakis, R., Koyuncu, H., Demirbas, A., 2006, An Investigation of Waste Foundry Sand in Asphalt Concrete Mixtures, Waste Manage Res., Vol. 24, 269-274.
- [16] Salokhe, E.P., Desai, D.B., 2011, Application of Foundry Sand in Manufacture of Concrete. Journal of Mechanical and Civil Engineering, 43-48.
- [17] Oliveira, G.V., da Silva, W.L., de Oliveira, E.R., Lansarin, M.A., dos Santos, J.H.Z., 2016, Foundry Sands as Supports for Heterogeneous Photocatalysts, Water, Air, Soil Pollut., Vol. 227, 373.
- [18] Yaghoubi E., Arulrajah, A., Yaghoubi, M., Horpibulsuk, S., 2020, Shear Strength Properties and Stress–Strain Behavior of Waste Foundry Sand, Constr. Build. Mater., Vol. 249, 118761.
- [19] Guney, Y., Aydılek, A.H., Demirkan, M.M., 2006, Geoenvironmental Behavior of Foundry Sand Amended Mixtures for Highway Subbases. Waste Manage., Vol. 26, 932-945.
- [20] Coz, A., Andrés, A., Soriano, S., Irabien, A., 2004, Environmental Behaviour of Stabilised Foundry Sludge. J. Hazard. Mater., Vol. 109, 95-104.
- [21] Ham, R.K., Boyle, W.C., Kunes, T.P., 1981, Leachability of Foundry Process Solid Waste, J. Environ. Eng. Div. ASCE, Vol. 107 (1), 155-170.
- [22] Lovejoy, M.A., Ham, R.K., Traeger, P.A., Wellander, D., Hippe, J., Boyle, W.C., 1996, Evaluation of Selected Foundry Wastes for Use in Highway Construction, Proceedings of the 19th International Madison Waste Conference, University of Wisconsin-Madison, 19-31.
- [23] Naik, T., Singh, S., Ramme, B., 2001, Performance and Leaching Assessment of Flowable Slurry, J. Environ. Eng., Vol. 127 (4), 359-368.
- [24] Siddique, R., Singh, G., Singh, M., 2018, Recycle Option for Metallurgical By-Product (Spent Foundry Sand) in Green Concrete for Sustainable Construction, J. Cleaner Prod., Vol. 172, 1111-1120.
- [25] Basar, H.M., and Aksoy, N.D. 2012, The Effect of Waste Foundry Sand (WFS) as Partial Replacement of Sand on the Mechanical, Leaching and Micro-Structural Characteristics of Ready-Mixed Concrete, Constr. Build. Mater., Vol. (35), 508-515.
- [26] Arulrajah, A., Yaghoubi, E., Imteaz, M., Horpibulsuk, S., 2017, Recycled Waste Foundry Sand as a Sustainable Subgrade Fill and Pipe-Bedding Construction Material: Engineering and Environmental Evaluation, Sustainable Cities Soc., Vol. 28, 343–349.

- [27] Miguel, R.E., Ippolito, J.A., Leytem, A.B., Porta, A.A., Noriega, R.BB., Dungan, R.S., 2012, Analysis of Total Metals in Waste Molding and Core Sands from Ferrous and Nonferrous Foundries, *J. Environ. Manage*, Vol. 110, 77-81.
- [28] Yazoghli-Marzouk, O., Vulcano-Greullet, N., Cantegrit, L., Friteyre, L., Jullien, A., 2014, Recycling Foundry Sand in Road Construction-Field Assessment, *Constr. Build. Mater.* Vol. 61, 69-78.
- [29] Mast, D.G., Fox, P.J. 1998. Geotechnical Performance of a Highway Embankment Constructed Using Waste Foundry Sand, *Recycled Materials in Geotechnical Applications*, ASCE, 66-85.
- [30] Miguel, R.E., Ippolito, J.A., Porta, A.A., Banda Noriega, R.B., Dungan, R.S., 2013, Use of Standardized Procedures to Evaluate Metal Leaching From Waste Foundry Sands, *J. Environ. Qual.* Vol. 42 (2), 1-6.
- [31] Foundry Industry Recycling Starts Today (FIRST), 2004, Foundry Sand Facts for Civil Engineers, Report No: FHWA-IF-04-004, Federal Highway Administration Environmental Protection Agency Washington, DC, USA.
- [32] Bradshaw, S.L., Benson, C.H., E.H. Olenbush, J.S. Melton, 2010, Using Foundry Sand in Green Infrastructure Construction, *Green Streets Highways*, 280–298.
- [33] Yin, J., Soleimanbeigi, A., Likos, W.J., Edil, T.B., 2018, Creep Response of Compacted Waste Foundry Sands for Use as Roadway Embankment Fill, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, Vol. 144.
- [34] Soleimanbeigi, A., Edil, T.B., 2015, Compressibility of Recycled Materials for Use as Highway Embankment Fill, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* Vol. 141 (5), 1-14.
- [35] Kumar, A., Sharma, R.K., Singh, B., 2014, Compaction and Sub-grade Characteristics of Clayey Soil Mixed with Foundry Sand and Fly Ash and Tile Waste, *International Conference on Advances in Engineering & Technology – 2014 (ICAET-2014)*, 29th-30th March 2014, Singapore 1-5.
- [36] Goodhue, M.J., Edil, T.B., Benson, C.H., 2001, Interaction of Foundry Sands with Geosynthetics, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127 (4), 353-362.
- [37] Kleven, J., Edil, T., Benson, C., 2000, Evaluation of Excess Foundry System Sands for Use as Subbase Material, *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, 1714, 40-48.
- [38] Abichou, T., Benson, C. H., Edil, T.B., 2000, Foundry Green Sands as Hydraulic Barriers: Laboratory Study, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 126 (12), 1174-1183.
- [39] Raju, K.V.S.B., Pai, G.M., Murthy, N., Anirudha, K.V., Rao, P.R., *Geotechnical Characterization of Miscellaneous Wastes*, Indian Geotechnical Conference - 2010, *GEOtrendz* December 16–18, 2010, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay, 53-56.
- [40] M. Heidemann, H.P. Nierwinski, D. Hastenpflug, B.S. Barra, Y.G. Perez, 2021, Geotechnical Behavior of a Compacted Waste Foundry Sand, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 277, 122267.
- [41] Partridge, B., Fox, P., Alleman, J., Mast, D., 1999, Field Demonstration of Highway Embankment Construction using Waste Foundry Sand, *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board.*, 1670, 98–105.
- [42] S. Javed, 1994, Use of Waste Foundry Sand in Highway Construction. Rep. JHRP/INDOT/FHWA-94/2 J, Purdue School of Engineering, West Lafayette, IN.
- [43] Abichou, T., Benson, C.H., Edil, T.B., 2002, Foundry Green Sands as Hydraulic Barriers: Field Study, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 128 (3), 206-215.
- [44] Koyuncu, H., Guney, Y., 2002, Properties of Permeability and Freeze-Thaw of Foundry (Casting Mold) Sand Wastes and Usable in Road Construction. In: *Proceedings 6th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development*, Edited by: WonPyo, Hong. Chung-Ang University and International Society Environmental Geotechnology Publisher, 2–5 July, 2002, Seoul, Korea, 85–90
- [45] Siddique, R., Singh, G., 2011, Utilization of Waste Foundry Sand (WFS) in Concrete Manufacturing, *Resour. Conserv. Recycl.*, Vol. 55 (11) 885-892.
- [46] Deng, A., Tikalsky, P. J., 2008, Geotechnical and Leaching Properties of Flowable Fill Incorporating Waste Foundry Sand, *Waste Manage.*, Vol. 28 (11), 2161-2170.
- [47] J. Yin, A. Soleimanbeigi, W.J. Likos, T.B. Edil, 2016, Compression Behavior of Foundry Sands, *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*, 1392–1403.
- [48] Nabhani, F., McKie, M., Hodgson, S., 2013, A Case Study on a Sustainable Alternative to the Landfill Disposal of Spent Foundry Sand, *Int. J. Sustain. Manufac.* Vol. 3 (1), 1-19.

- [49] Orkas, J., 2001, Technical and environmental requirements for surplus foundry sand utilization, Valimotekniikan julkaisuja, no. TKK-VAL 3/2001, Otaniemi, 148.
- [50] Abichou, T.H., Benson, C.H., Edil, T.B., 1999, Beneficial Reuse of Foundry By-Products, Environmental Geotechnical Report 99-1, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison, USA.
- [51] C.H., Benson, Badshaw, S., 2011, User Guideline for Foundry Sand in Green Infrastructure Construction, Recycled materials resource center, University of Wisconsin-Madison, USA.
- [52] Pasetto, M., Baldo, N., 2015, Experimental Analysis of Hydraulically Bound Mixtures Made with Waste Foundry Sand and Steel Slag, *Mater. Struct.*, Vol. 48 (8), 2489-2503.
- [53] L.M.G. Klinsky, G.T.P. Fabbri, dos Santos Bardini, V.S., 2016, Reuse of Waste Foundry Sand Mixed with Lateritic Clayey Soils in Pavement Bases and Sub-Bases Courses, 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, Springer, Dordrecht, Netherlands, 569-582.
- [54] Tanyu, B.F., Benson, C.H., Edil, T.B., Kim, W.H., 2004, Equivalency of Crushed Rock and Three Industrial By-products used for Working Platforms during Pavement Construction, *Transp. Res. Rec.*, 1874, 59-69.
- [55] Foundry Society, 2019. Bases and Subbases. American Foundry Society AFS. web sayfası: <https://www.afsinc.org/bases-and-subbases>, erişim tarihi: 16.06.2021.
- [56] Zhang, Y., Sappinen, T., Korkiala-Tanttu, L., Vilenius, M., Juuti, E., 2021, Investigations into Stabilized Structures with the Use of Waste Foundry Sand, *Res. Conserv. Recycl.*, Vol. 170, 105585.
- [57] Yazoghli-Marzouk O, Jullien A, Ropert C., 2012, Environmental Assessment of Foundry Sands Reuse Scenario, 4th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Porto, Portugal.
- [58] Abichou T, Edil TB, Benson CH, Bahia H., 2004, Beneficial Use of Foundry By-Products in Highway Construction, *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication 126, M. K. Yegian and E. Kavazanjian, eds., Vol. 1, 715-722.
- [59] Abichou, T., Edil, T.B., Benson, C.H., Tawfiq, K., 2005, Hydraulic Conductivity of Foundry Sands and Their Use as Hydraulic Barriers. In: *Recycled Materials in Geotechnics*. Geotechnical Special Publications 127, ASCE, Reston, Va., 186-200.
- [60] Prabhu, G.G., Hyun, J.H., Kim, Y.Y., 2014, Effects of Foundry Sand as a Fine Aggregate in Concrete Production, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 70, 514-521.
- [61] Prabhu, G.G., Bang, J.W., Lee, B.J., Hyun, J.H., Kim, Y.Y., 2015, Mechanical and Durability Properties of Concrete Made with Used Foundry Sand as Fine Aggregate, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015, Article ID 161753.
- [62] Iqbal, M.F., Liu, Q.F., Azim, I., Zhu, X., Yang, J., Javed, M.F., Rauf, M., 2020, Prediction of Mechanical Properties of Green Concrete Incorporating Waste Foundry Sand based on Gene Expression Programming, *J. Hazard. Mater.*, Vol. 384, 121322.
- [63] Behnood, A., Golafshani, E.M., 2020, Machine Learning Study of the Mechanical Properties of Concretes Containing Waste Foundry Sand, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 243, 118152.
- [64] de Matos, P.R., Pilar, R., Bromerchenkel, L.H., Schankoski, R.A., Gleize, P.J., de Brito, J., 2020, Self-compacting Mortars Produced with Fine Fraction of Calcined Waste Foundry Sand (WFS) as Alternative Filler: Fresh-state, Hydration and Hardened State Properties, *J. Cleaner Prod.*, Vol. 252, 119871.
- [65] Torres, A., Bartlett, L., Pilgrim, C., 2017, Effect of Foundry Waste on the Mechanical Properties of Portland Cement Concrete, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 135, 674-681.
- [66] Mavroulidou, M., Lawrence, D., 2019, Can Waste Foundry Sand Fully Replace Structural Concrete Sand?, *J. Mater., Cycles Waste Manag.*, Vol. 21, 594-605
- [67] Manoharan, T., Lakshmanan, D., Mysamy, K., Sivakumar, P., and Sircar, A., 2018, Engineering Properties of Concrete with Partial Utilization of Used Foundry Sand, *Waste Manage.*, Vol. 71, 454-460.
- [68] Sandhu, R.K., Siddique, R., 2019, Strength Properties and Microstructural Analysis of Self-Compacting Concrete Incorporating Waste Foundry Sand, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 225, 371-383.

- [69] Siddique, R., Noumowe, A., 2008, Utilization of Spent Foundry Sand in Controlled Low Strength Materials and Concrete, *Resour. Conservat. Recycl.*, Vol. 53, 27-35.
- [70] Siddique, R., 2009, Utilization of Waste Materials and By-Products in Producing Controlled Low-Strength Materials, *Resour. Conservat. Recycl.*, Vol. 54, 1-8.
- [71] Venkatesan, M., Zaib, Q., Shah, I.H., Park, H.S., 2019, Optimum Utilization of Waste Foundry Sand and Fly Ash for Geopolymer Concrete Synthesis Using D-optimal Mixture Design of Experiments, *Resour. Conservat. Recycl.*, Vol. 148, 114-123.