



İçme Suyu Arıtma Çamurlarının Geoteknik Özellikleri ve Faydalı Kullanım Alanları

Müge Balkaya^{1*}

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

E-Posta: balkayamu@itu.edu.tr

Özet: İçme sularının arıtımı sırasında su içeriği yüksek (genellikle ağırlıkça %95'den daha fazla) çamur ortaya çıkmaktadır. Genellikle koagülasyon işleminden ortaya çıkan bu çamur, kullanılan koagülant türüne bağlı olarak alum ya da demir çamuru olarak adlandırılmaktadır. Katı madde miktarı az, su içeriği fazla olduğu için büyük hacimler oluşturan su arıtma çamurları arıtma tesislerinde işlenmesi ve bertarafı sorun oluşturan bir atıktır. İçme suyu arıtma çamurlarının çeşitli alanlarda faydalı kullanıma sunulması bu atıkların bertarafıyla ilgili problemleri de ortadan kaldıracığı için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, içme suyu arıtma çamurlarının genel özellikleri hakkında bilgi verilmiş ve geoteknik alanındaki faydalı kullanım alanları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İçme suyu arıtma çamuru, geoteknik özellikler, faydalı kullanım, çevre geotekniği

The Beneficial Use of Water Treatment Sludges in Geotechnical Engineering

Abstract: During the treatment of drinking water, sludge with high water content (usually more than 95% by weight) occurs. This sludge, which usually results from the coagulation process, is called alum or iron sludge, depending on the type of the coagulant used. Since the the amount of the solid matter in the sludge is low and the water content is high, the produced water treatment sludge constitutes large volumes, and therefore the treatment and disposal of water treatment sludges in the treatment plants cause problems. The beneficial use of drinking water treatment sludge in various fields is of great importance as it will eliminate the problems related to the disposal of these wastes. In this study, information about the general properties of drinking water treatment sludges were introduced, and the beneficial uses of these sludges in geotechnical applications were investigated.

Key Words: water treatment sludge, geotechnical properties, beneficial use, environmental geotechnics

GİRİŞ

İçme suyu arıtma tesislerinde su arıtımı sırasında ortaya çıkan yan ürün ya da diğer bir ifadeyle katı kalıntılar içme suyu arıtma çamuru olarak adlandırılmaktadır. İçme suyu arıtma tesislerinde suyun arıtım kademelerinden ortaya çıkan katı kalıntılar, sedimantasyon tankından ve filtre geri yıkamadan kaynaklanan çamurlu sudur. Askıda katı madde içeriği genellikle yaklaşık 1000 mg/L, hatta bazen 10000 mg/L'nin üzerindedir ^[1]. İçme suyu artma çamuru olarak adlandırılabilen bu kalıntılar, büyük hacimlerde ortaya çıkan ve ekonomik olarak uygun, çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi gerekli olan bir atık olarak düşünülebilir.

Su arıtma çamurlarının çevresel olarak kabul edilebilir ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için üzerinde dikkatli bir şekilde düşünülmesi gerekmektedir ^[2]. Daha ucuz olmasına rağmen, arıtma çamurları için basit bir nihai bertaraf yöntemi (örneğin doğrudan nehre deşarj) uygun bir çözüm değildir. Çünkü arıtmada kullanılan kimyasal ürünler su ortamlarının ve toprağın kirlenmesine neden olabilmektedir. Su arıtma tesislerinde artan miktarlarda ortaya çıkan atık çamurun ekonomik ve çevre dostu bir şekilde yönetimi oldukça önemli bir konudur. Geri kazanma, geri dönüşüm ve yeniden kullanım, çevrenin korunması konusunda hukuki alanda sıkı çevresel düzenlemeler uyarınca su arıtma çamurlarının yönetimine ilişkin sorunlara sürdürülebilir bir çözüm sağlayabilir ^[2]. İçme suyu arıtma çamurlarının faydalı kullanımı düşük maliyetli bir teknolojik çözüm sağlamanın yanı sıra su arıtma hizmeti yapan kamu kuruluşları için etkili bir atık yönetim seçeneği oluşturur ^[3]. Dolayısıyla da su arıtma çamurlarının bertaraf edilmesi (örn. katı atık depolama sahalarında biriktirilmesi) yerine çeşitli amaçlarla kullanıma sunulması sürdürülebilir atık yönetimi açısından uygun bir çözüm olmaktadır.

Günümüzde içme suyu arıtma çamurlarının faydalı kullanım alanları çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir, halen de üzerinde çalışılan bir araştırma konusudur. Konu ile ilgili olarak gerçekleştirilen çalışmalar, içme suyu arıtma çamurlarının atıksudan çeşitli kirleticilerin gideriminde

* İlgili E-posta: balkayamu@itu.edu.tr

adsorban olarak kullanımının (örn. fosfor gideriminde^[3]) yanı sıra inşaat mühendisliğinde çeşitli uygulama alanlarında da kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma kapsamında, içme suyu arıtma çamurlarının genel özellikleri hakkında bilgi verilmiş ve alum çamurunun geoteknik alanında faydalı kullanımları ile ilgili alternatifler incelenmiştir.

İçme Suyu Arıtma Çamurlarının Genel Özellikleri

Yüzey suları, askıda katı maddeler ile birlikte kolloidal maddeler ve çeşitli yabancı maddeleri de beraberinde getirir. Bu nedenle, yüzey sularının mevcut ham suyun kalitesine ve işlendikten sonra içme suyu olarak kullanılması için gerekli özelliklere uygun olacak şekilde bir arıtma işleminden geçirilmesi gerekmektedir. İçme suyu arıtma tesislerinde ham suya koagülasyon, flokülasyon, çökeltme, filtrasyon ve dezenfeksiyon işlemleri uygulanmaktadır. Bu arıtma işlemleri sırasında içme suyu arıtma çamuru adı verilen oldukça büyük miktarlarda yan ürün, atık madde ortaya çıkmaktadır^[4]. Dharmappa ve ark.^[5] küresel ölçekte içme suyu arıtma tesislerinden günde 10000 ton arıtma çamurunun ortaya çıktığı tahmininde bulunmuşlardır. Kullanıma sunulan içme suyu miktarındaki artış ve içme suyu ile ilgili sıkı yasal düzenlemelerden dolayı ortaya çıkan arıtma çamurunun yıllar içerisinde daha da artacağı öngörüsünde bulunmuşlardır. Su arıtımı sırasında ortaya çıkan kalıntıların hacmi, su arıtma işleminde kullanılan arıtma teknolojisine ve ham suyun bulanıklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir^[1]. Örneğin bu rakam koagülant olarak alum ve demir (III) klorür'ün birlikte kullanıldığı 720000 m³/gün hizmet kapasitesine sahip İstanbul Cumhuriyet İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde yaklaşık 115 ton/gün, 1540000 m³/gün hizmet kapasitesine sahip İstanbul Ömerli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde ise yaklaşık 40 ton/gün civarlarındadır^[6].

İçme suyu arıtma tesislerinde ortaya çıkan çamurlar, çoğunlukla mikroorganizmalar, organik ve süspanse maddeler, koagülantlar ve kimyasal unsurlar içeren jelatinimsi yapıda çamurlardır^[4]. Çamurun jelatinimsi yapıda olması içeriğindeki demir veya alum hidratlardan kaynaklanmaktadır^[7]. Su arıtma çamurlarında temel bileşenler çok büyük değişiklik göstermese de, bileşimleri her çamur için az çok spesifik olup büyük ölçüde de kullanılan ham su kaynağının özelliklerine, kullanılan koagülant türüne, uygulanan doza ve tesis işletme koşullarına bağlıdır^[5]. Bunların yanı sıra, ham su kalitesi, pH, su sıcaklığı, mevsim ve kullanılan arıtma işlemleri de dahil olmak üzere çeşitli faktörler üretilen arıtma çamurunun kalitesini ve miktarını etkiler^[8]. Özellikle arıtılacak suyun yüksek renk ve bulanıklığa sahip olması, arıtma sırasında çamur oluşumunu artırarak kullanılması gerekli kimyasal katkı miktarının da artırılmasını gerektirebilir. Bu durum, çamurun özelliklerini etkileyerek değişken olmasını sağlar^[5]. Tablo 1'de içme suyu arıtma çamurlarının karakteristik özellikleri sunulmaktadır.

Tablo 1. İçme suyu arıtma çamurlarının tipik özellikleri^[4]

| Parametre | Alum çamuru | Demir çamuru |
|-----------------------------------|--------------|--------------|
| Aluminyum (% kuru ağırlık) | 29,7±13,3 | 10,0±4,8 |
| Demir(% kuru ağırlık) | 10,2±12 | 26,0±15,5 |
| Kalsiyum (% kuru ağırlık) | 2,9±1,7 | 8,32±9,5 |
| Magnezyum (% kuru ağırlık) | 0,89±0,8 | 1,6 |
| SiO ₂ (% kuru ağırlık) | 33,4±26,2 | * |
| Çinko (mg/kg) | 33,9±28 | 18,7±16 |
| Kurşun (mg/kg) | 44,1±38,2 | 19,3±25,3 |
| Kadmiyum (mg/kg) | 0,5 | 0,48±0,26 |
| Nikel (mg/kg) | 44,3±38,4 | 42,9±39,2 |
| Bakır (mg/kg) | 33,72±32,5 | 18,7±25,8 |
| Krom (mg/kg) | 25,0±20,1 | 25,7±21,6 |
| Kobalt (mg/kg) | 1,06 | 1,61±1,1 |
| P (% kuru ağırlık) | 0,35 | 0,36 |
| Toplam katı madde (mg/L) | (2500–52345) | (2132–5074) |
| pH | 7,0±1,4 | 8,0±1,6 |
| BOI ₅ (mg/L) | 45 (2–104) | * |

Not: Tabloda, "ortalama+standart sapma" değerleri verilmiştir. *: Veri mevcut değil

İçme Suyu Arıtma Çamurlarının Bertaraf Yöntemleri

İçme suyu arıtma çamurlarının bertarafında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Akarsulara deşarj etme, çamur lagünlerinde depolama, mekanik veya termal işlemlerin ardından katı atık depolama tesislerinde depolama, yakma ve atık su arıtma tesislerine gönderme içme suyu arıtma çamurlarının başlıca bertaraf yöntemleridir [4,9-10]. Ancak, uygulanan bertaraf yöntemleri çeşitli sorunları da beraberinde getirmektedir. Örneğin, her ne kadar birçok ülkede yasaklanmış olsa da bazı gelişmekte olan ülkelerde halen kullanılmakta olan akarsulara deşarj etme uygulaması sonucunda yüzey suyu kalitesinde düşme meydana gelmesi ve bu suyu kullanan insan ve hayvan sağlığının olumsuz etkilemesi gibi çok ciddi çevresel sorunlarla karşılaşılabilir [11]. Bunun yanı sıra, çamurların doğrudan, hiçbir iyileştirme (kurutma, vb.) yapılmadan katı atık depolama sahalarında depolanması ise atık kütlelerinin stabilitesinde kayıplara yol açabileceği gibi, büyük depolama hacimlerine ihtiyaç duyulmasına da sebep olabilmektedir.

Uygun maliyetli ve çevre dostu bertaraf seçeneklerinin araştırılması, daha sıkı çevresel düzenlemeler, katı atık depolama sahaları konusunda halk onayının azalması, bertaraf maliyetlerinin artması ve katı atık depolama sahalarının kapasitesinin azalması nedeniyle acil bir öncelik haline gelmiştir. Mevcut mevzuat, içme suyu arıtma çamurlarını atık olarak sınıflandırmaktadır. İçme suyu arıtma çamurları genellikle kimyasal olarak şartlandırılmakta ve katı atık depolama sahalarına gönderilmeden önce mekanik olarak susuzlaştırılmaktadır [12].

İçme Suyu Arıtma Çamurlarının Geoteknik Özellikleri

İçme suyu arıtma çamurlarının oldukça yüksek olan su muhtevalarını azaltmak için santrifüj veya çamur kurutma yatakları gibi susuzlaştırma yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak arıtma çamurları çoğu zaman bu işlemlerden sonra bile geoteknik açıdan yeterli mukavemete sahip olmayabilirler. Bununla beraber, açık havada veya fırınlarda kurutulduklarında granüler malzemelere dönüşürler [13-15]. Bu sayede çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımları mümkün olabilmektedir.

İçme suyu arıtma çamurlarının katı madde oranı ve özgül ağırlıkları düşüktür. Bazı çalışmalarda likit ve plastik limit değerlerinin oldukça yüksek olduğu belirtilirken [16-17], bazı çalışmalarda ise plastik olmayan malzemeler oldukları ifade edilmiştir [18-19]. Yüksek plastisite, içme suyu arıtma çamurunun suya karşı yüksek afinitesinin ve yüksek organik madde içeriğinin bir göstergesidir [20]. Kıvam limitlerinde gözlenen bu farklılığın arıtma tesislerinde kullanılan farklı kimyasallardan kaynaklanabileceği belirtilmiştir [18-19]. Bununla birlikte, literatürde su arıtma çamurlarının yüksek kayma mukavemeti açalarına sahip kohezyonsuz veya düşük kohezyonlu malzemeler oldukları ifade edilmiştir [10,16-17,20].

İçme suyu arıtma çamurlarının drenajlı kayma mukavemetleri yüksek, ancak drenajsız mukavemetleri çok düşüktür. Ayrıca son derece hassas ve tiksotropiktirler. Demir çamurları ile karşılaştırıldığında, alum çamurları daha plastik ve sıkıştırılabilir ve aynı katı içeriğinde daha yüksek drenajsız kayma mukavemetine sahiptirler [20].

Genellikle sıkışabilirlikleri yüksek olan içme suyu arıtma çamurları düşük permeabilite değerleri nedeniyle geçirimsizlik sağlanması gereken geoteknik uygulamalar için ümit verici bir malzeme olarak görünmektedir [16-17,20]. Tablo 2'de içme suyu arıtma çamurlarından alum çamurlarının geoteknik özelliklerine ilişkin çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmaların bir özeti sunulmaktadır.

Tablo 2. Alum çamurlarının geoteknik özellikleri

| | | |
|---|--------------|---------------|
| Tabii su muhtevası (%) | 430-900 | [7,18,20] |
| Katı madde içeriği (%) | 12-40,4 | [17-18,20-21] |
| Organik madde miktarı (%) | 39 | [18] |
| Likit Limit (%) | NP - 100-550 | [16-19] |
| Plastik Limit (%) | NP - 47-325 | [15-19, 21] |
| Özgül ağırlık (-) | 1,8-2,72 | [16-18,21-22] |
| Yakma kaybı (%) | 10-60 | [16-17] |
| Tabii Birim hacim Ağırlık (t/m ³) | 1,0-1,2 | [16-17] |
| Kuru Birim Hacim Ağırlık (t/m ³) | 0,12-0,36 | [16-17] |
| Kohezyon (kPa) | 0-8 | [10,16-18,20] |

| | | |
|--|-------------------------------------|----------------|
| Kayma Mukavemeti Açısı (°) | 28-44 | [10,16-18,20] |
| Optimum su muhtevası (%) | 65-70 | [18-19] |
| Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³) | 8-8,55 | [18] |
| Konsolidasyon katsayısı (cm ² /s) | 3,82x10 ⁻³ | [18] |
| Permeabilite | 10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁹ | [9-10,16-19] |
| Sıkışma katsayısı (Cc) (-) | 0,22-6,7 | [16-18, 20,23] |

İçme suyu arıtma çamurlarının faydalı kullanıma sunulması amacıyla kireç ve çeşitli dolgu maddeleriyle stabilize edilmesi uygun bir alternatiftir. Bu yolla çamurun işlenebilirliği artırılır ve dolgularda, hendek ve istinat duvarı geri dolgularında ve düzenli katı atık depolama alanlarında kaplama malzemesi olarak kullanım gibi geoteknik uygulamalarda kullanılabilirlikleri sağlanır. Çamurların arıtma tesisinden ilk çıktıkları haldeki mekanik özelliklerinin belirlenmesi, daha sonra geoteknik uygulamalardaki muhtemel faydalı kullanım alanlarının belirlenmesi ve gerekli katkı maddelerinin çeşit ve miktarının seçilmesi açısından önemli bir husustur.

Uygun çamur kullanımı ve etkili atık depolama tasarım ve inşaatı için, çamurun mühendislik davranışı, örneğin, plastisite özellikleri, su muhtevası-birim hacim ağırlık ilişkileri, sıkıştırılabilirlik ve kayma mukavemeti tam olarak anlaşılmalıdır.

İçme Suyu Arıtma Çamurlarının Faydalı Kullanım Alanları

Dünya nüfusteki artışa bağlı olarak temiz içme suyuna artan talep ve buna bağlı olarak ortaya çıkan içme suyu arıtma çamurlarındaki artış, bu çamurların depolanması konusundaki endişeleri artırmaktadır. Bu nedenle, arıtma çamurlarının çeşitli faydalı kullanım alanlarında yeniden değerlendirilmeleri, katı atık depolama tesislerinde kaplayacakları alanların ve bununla ilgili maliyetlerin azaltılmasının sağlanması ve çevre açısından oluşturacakları çeşitli sorunların önlenmesi amacıyla bilim insanları tarafından önemle incelenmektedir [24-29]. Genel olarak, içme suyu arıtma çamurları tehlikeli olmadığı [14,30-31] ve bazı kirleticilerin atık su ve topraktan uzaklaştırılmasında etkili malzemeler oldukları için, çeşitli geoteknik ve geo-çevre uygulamalarında kullanılabilmesi ifade edilmektedir [18-19,32-34]. Ancak, çamurun hangi alanda kullanılacağına belirlenmesinde çamurun bazı özelliklerin bilinmesi ve kullanım için gerekli şartları sağlayıp sağlamadığının belirlenmesi önem taşımaktadır. Çamurun hangi faydalı kullanım alanı için uygun olabileceği çamurun bazı geoteknik özellikleri ile de yakından ilişkilidir.

Günümüzde çevre kirliliğinin önlenmesi, atıkların çevre kirliliğine yol açmayacak şekilde bertaraf edilmesi veya çevreye uyumlu bir şekilde faydalı kullanım alanlarının bulunması, bu sayede sürdürülebilir, ekonomik ve çevreye duyarlı bir atık yönetimi uygulanması büyük önem kazanmıştır. Çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda su arıtma çamurlarının geoteknik ve geo-çevre uygulamalarında kullanımı için özellikleri incelenmiş [13-17,32-33] ve arıtma çamurlarının geo-malzeme olarak kullanım potansiyeli ortaya konulmuştur [19-20,34-35].

Şimdiye kadar araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda içme suyu arıtma çamurlarının hafif agrega [36-38], beton ve harç malzemesi [39-42], beton için kür malzemesi [43], çimento [44-49], tuğla [36, 48-55], seramik [56-58] gibi yapı ve inşaat malzemelerinin üretiminde, ziraî açıdan toprak iyileştirme [26,59-74], yapay sulak alan [75-85], düzenli katı atık depolarında günlük ve nihai örtü tabakası [10,19,35,86-87], yol dolgusu ve geri dolgu malzemesi [20,48] gibi geoteknik uygulamalarda kullanılabilmesi tespit edilmiştir. Bununla birlikte, tüm dünyada içme suyu arıtma işlemleri sonucunda büyük miktarlarda ortaya çıkan içme suyu arıtma çamurlarının yeni faydalı kullanım alanlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar halen önemini korumaktadır.

SONUÇLAR

İçme suyu arıtma tesislerinde ortaya çıkan büyük miktarlarda içme suyu arıtma çamuru ve buna bağlı atık maliyetleri ve çevresel kısıtlamalar nedeniyle, arıtma çamurlarının yönetimi son yıllarda önemli bir konu haline gelmiştir. Ülkemizde de içme suyu arıtma tesislerinde bertaraf edilmek üzere bekleyen tonlarca atık çamur ile karşı karşıya kalınmaktadır. Arıtma çamurlarıyla ilgili problemleri en aza indirmek için, çeşitli faydalı kullanım alanlarının bulunup bu alanlarda kullanılmasının teşvik edilmesi oldukça önemlidir.

İçme suyu arıtma çamurlarının, atık sudan ağır metallerin ve çeşitli kirleticilerin gideriminde adsorban olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir. Bu kullanım alanlarının yanı sıra beton, çimento, hafif agrega, tuğla ve seramik gibi bazı inşaat malzemelerinin yapımında da kullanımları çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir [34-56]. İçme suyu arıtma çamurları ayrıca yapay sulak alanlarda ve zirai açıdan toprak iyileştirmede de kullanılabilir [58-67, 74-83].

Bu malzemeler geoteknik açıdan incelendiklerinde, yüksek kayma dayanımı ve düşük permeabilite değerine sahip, mekanik olarak stabil malzemeler oldukları görülmektedir. Bu sayede çeşitli geoteknik ve geo-çevre uygulamaları için kullanımları uygun olmaktadır. İçme suyu arıtma çamurları, özellikle düşük permeabilite değerleri nedeniyle düzenli katı atık depolarında günlük ve nihai örtü tabakası gibi geçirimsizlik sağlanması gereken geoteknik uygulamalar için oldukça uygun bir alternatiftir. Buna ilaveten, yol dolgusu ve çeşitli geoteknik uygulamalarda geri dolgu malzemesi olarak da kullanılabilirler.

Su arıtma tesislerinde çok büyük miktarlarda ortaya çıkan ve normal şartlar altında bir atık olarak bertaraf edilmesi veya katı atık depolama tesislerinde depolanması gereken ve dolayısıyla da çevre açısından önemli bir sorun teşkil eden bu çamurlar esasen uygun maliyetli, kolay ulaşılabilir, düşük geçirimli ve yüksek kayma dayanımına sahip malzemelerdir. Bu özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, içme suyu arıtma tesisi çamurlarının faydalı kullanım alanlarında değerlendirilmesi ve yeni kullanım alanlarının bulunmasına ilişkin çalışmaların teşvik edilmesi, sürdürülebilir atık yönetimi ve ülke ekonomisi açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

- [1] Sun, Y., Fan, W., Zheng, H., Zhang, Y., Li, F., Chen, W., 2015, Evaluation of Dewatering Performance and Fractal Characteristics of Alum Sludge, PLoS ONE, Vol. 10(6),1-16.
- [2] Ahmad, T., Ahmad, K., Alam, M., 2016, Sustainable Management of Water Treatment Sludge Through 3'R' Concept, J. Cleaner Prod., Vol. 124, 1-13.
- [3] Mortula, M.M., Gagnon, G.A., 2007, Alum Residuals as a Low Technology for Phosphorus Removal from Aquaculture Processing Water, Aquacultural Eng., Vol. 36, 233-238.
- [4] Babatunde, A.O., Zhao, Y.Q., 2007, Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: An International Review of Beneficial Reuses, Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. Vol. 37, 129-164.
- [5] Dharmappa HB, Hasia A, Hagare P (1997) Water treatment plant residuals management. Water Sci Technol 35(8):45-56
- [6] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Faaliyet Raporu, 2017, web sayfası: http://www.iski.gov.tr/web/assets/SayfalarDocs/faaliyetraporlari/faaliyetraporu2008/2017_Faaliyet_Raporu..pdf, erişim tarihi: 05.01.2019.
- [7] Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., 2003, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th ed., Metcalf & Eddy Inc., New York, NY, McGraw-Hill.
- [8] Lin, S., Evans, R.L., Schnepfer, D., Hill, T., 1984, Evaluation of Wastes from the East St. Louis Water Treatment Plant and Their Impact on the Mississippi River, Illinois State Water Survey Div., Champaign—National Technical Information Service-NTIS, ISWS/CIR- 160/84.
- [9] M.C. Wang, T. Tseng, 1993, Permeability Behavior of a Water Treatment Sludge, J. Geotech. Eng., Vol. 119, 1672-1677.
- [10] B. O'Kelly, 2010, Landfill Disposal of alum Water Treatment Residues, some Pertinent Geoengineering Properties, J. Res. Sci. Technol., Vol. 7, 95-113.
- [11] CPCB 2011 Status of water treatment plants in India (New Delhi: Central Pollution Control Board
- [12] Razali, M., Zhao, Y.Q., Bruen, M., 2007, Effectiveness of a Drinking-Water Treatment Sludge in Removing Different Phosphorus Species from Aqueous Solution, Separ. Purif. Technol., Vol. 55, 300-306.
- [13] Basim, S.C., 1999, Physical and Geotechnical Characterization of Water Treatment Plant Residuals, New Jersey Institute of Technology.
- [14] Hsieh, H.N., Raghun. D., 1997, Criteria development for water Treatment Plant Residual Monofill, AWWA - American Water Works Association.

- [15] Xia, Z., 1994, Geotechnical Characterization of Water Treatment Plant Residuals, New Jersey Institute of Technology.
- [16] O'Kelly, B.C., Quille, M.E., 2009, Shear Strength Properties of Water Treatment Residues, *Geotech. Eng.*, Vol. 163, 23-35.
- [17] O'Kelly, B.C., 2008, Geotechnical properties of a Municipal Water Treatment Sludge Incorporating a Coagulant, *Can. Geotech. J.*, Vol. 45, 715-725.
- [18] Balkaya, M., Evaluation of the Geotechnical Properties of Alum Sludge, Zeolite, and Their Mixtures for Beneficial Usage, *Environ. Prog. Sustain.*, Vol. 34(4), 1028-1037.
- [19] Raghu, D., Hsieh, H.N., Neilan, T., Yih, C.T., 1987, Water treatment Plant Sludge as Landfill Liner, In R.D. Woods (Ed.), *Geotechnical Practice for Waste Disposal'87*, New York: American Society of Civil Engineers, 744-758.
- [20] Wang, M.C., Hull, J.Q., Jao, M., Dempsey, B.A., Cornwell, D.A., 1992, Engineering Behavior of Water Treatment Sludge, *J. Environ. Eng.*, Vol. 118(6), 848-864.
- [21] Wang, M. C , Hull, J. Q., Jao, M., 1991, Stabilization of Water Treatment Plant Sludge for Possible Utilization as Embankment Material, *Transp. Res. Rec.*, Vol. 1345, 36-43.
- [22] Raghu, D., Hsieh, H.N., 1986, Material Properties of Water Treatment Plant Sludges, *Int. J. Civ. Eng. Pract. Des. Eng.*, 5(5): 927-941.
- [23] Knocke, W. R., and Wakeland, D. L., 1983, Fundamental Characteristics of Water Treatment Plant Sludges, *J. AWWA*, Vol. 75(10), 516-523.
- [24] UN-Water, 2015, Wastewater management: a UN-Water Analytical Brief, web sayfası: <http://www.unwater.org/publications/wastewater-management-un-water-analytical-brief/>, erişim tarihi: 15/11/2016.
- [25] United Nations World Water Assessment Programme, WWAP, 2012, The Nations World Water Development Report 4. Managing Water under Uncertainty and Risk, UNESCO, Paris, web sayfası: <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/WWDR4%20Volume%201-Managing%20Water%20under%20Uncertainty%20and%20Risk.pdf>, erişim tarihi: 20/03/2015.
- [26] Qi, L., Cheng, R., Wang, H., Zheng, X., Zhang, G., Li, G., 2011, Recycle of Alum Sludge with PAC (RASP) for Drinking Water Treatment, *Desalin. Water Treat.*, Vol. 25, 170-175.
- [27] Babatunde, A.O., Jeyakumar, L.G., Zhao, Y., 2011, Constructed Wetlands using Aluminum-Based Drinking Water Treatment Sludge as P Removing Substrate: Should Aluminum Release be a Concern?, *J. Environ. Monit.* Vol. 13, 1775-1783.
- [28] Heil, D.M., Barbarick, K.A., 1989, Water Treatment Sludge İnfluence on the Growth of Sorghum-Sudangrass, *J. Environ. Qual.* Vol. 18, 292-298.
- [29] Viraraghavan, T., Ionescu, M., 2002, Land Application of Phosphorus-Laden Sludge: A Feasibility Analysis, *J. Environ. Manage.* Vol. 64, 171-177
- [30] Hsieh, H., Raghu, D., Tian, P., 2006, Leaching Studies on a Model Monofill of Water Treatment Plant Residuals, *Environ. Eng. Sci.*, Vol. 23, 230-238.
- [31] Environmental Protection Agency, 2000, Landfill Manuals, Landfill Site Design, Wexford: EPA.
- [32] O'Kelly, B.C., Quille. M.E., 2009, Compressibility and Consolidation of Water Treatment Residues, *Proc. Inst. Civ. Eng. Waste Resour. Manag.*, Vol. 162, 85-97.
- [33] Vandermeijden, C., Cornwell, D.A., 1998, Nonmechanical Dewatering of Water Plant Residuals, AWWA Research Foundation and American Water Works Association.
- [34] Roque, A.J., Carvalho, M., 2006, Possibility of Using the Drinking Water Sludge as Geotechnical Material, In: Telford, T. (Ed.), *Proceedings of the 5th International Congress on Environmental Geotechnics*, ASCE-American Society of Civil Engineers, London, 1535-1542.
- [35] Montalvan, E.L.T., Boscov, M.E.G., 2016, Geotechnical Characterization of a Soil-Water Treatment Sludge Mixture, In: *Geo-Chicago*, ASCE, Chicago, 418-427.
- [36] Huang, C., Pan, J.R., Sun, K.D., Liaw, C.T., 2001, Reuse of Water Treatment Plant Sludge and Dam Sediment in Brick Making, *Water Sci. Technol.*, Vol. 44(10), 273-277.
- [37] Huang, C.H., Wang, S.Y., 2013, Application of Water Treatment Sludge in the Manufacturing of Lightweight Aggregate, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 43, 174-183.

- [38] Sales, A., De Souza, F.R., Almeida, F.R., 2011, Mechanical Properties of Concrete Produced with a Composite of Water Treatment Sludge and Sawdust, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 25(6), 2793-2798.
- [39] Zamora, R.M.R., Alfaro, O.C., Cabirol, N., Ayala, F.E., Moreno, A.D., 2008, Valorization of Drinking Water Treatment Sludges as Raw Materials to Produce Concrete and Mortar, *Am. J. Environ. Sci.*, Vol. 4(3), 223-228.
- [40] Rodríguez, N.H., Ramírez, S.M., Varela, M.T.B., Guillem, M., Puig, J., Larrotcha, E., Flores, J., 2010, Re-use of Drinking Water Treatment Plant (DWTP) Sludge: Characterization and Technological Behaviour of Cement Mortars with Atomized Sludge Additions, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 40, 778-786.
- [41] Sales, A., De Souza, F.R., 2009, Concretes and Mortars Recycled with Water Treatment Sludge and Construction and Demolition Rubble, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 23, 2362-2370.
- [42] Kaosol, T., 2010, Reuse Water Treatment Sludge for Hollow Concrete Block Manufacture, *Energy Res. J.*, Vol. 1(2), 131-134.
- [43] Nowasell, Q.C., Kevern, J.T., 2015, Using Drinking Water Treatment Waste as a Lowcost Internal Curing Agent for Concrete, *ACI Mater. J.*, Vol. 112(1), 69-78.
- [44] Yen, C.L., Tseng, D.H., Lin, T.-T., 2011, Characterization of Eco-Cement Paste Produced from Waste Sludges, *Chemosphere*, Vol. 84, 220-226.
- [45] Chen, H., Mab, X., Dai, H., 2010, Reuse of Water Purification Sludge as Raw Material in Cement Production, *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 32, 436-439.
- [46] Pan, J.R., Huang, C., Lin, S., 2004, Reuse of Fresh Water Sludge in Cement Making, *Water Sci. Technol.*, Vol. 50(9), 183-188.
- [47] El-Didamony, H., Khalil, K.A., Heikal, M., 2014, Physico-Chemical and Surface Characteristics of Some Granulated Slag-Fired Drinking Water Sludge Composite Cement Pastes, *HBRC J.*, Vol. 10, 73-81.
- [48] Carvalho, M., Antas, A., 2005, Drinking Water Sludge as a Resource, In: *Proceedings of IWA Specialized Conference on Management of Residues Emanating from Water and Wastewater Treatment*, Johannesburg, South Africa.
- [49] Goldbold, P., Lewin, K., Graham, A., Barker, P., 2003, The Potential Reuse of Water Utility Products as Secondary Commercial Materials, In: *WRC Technical Report Series. No. UC 6081, Project Contract No. 12420-0.*
- [50] Huang, C., Pan, J.R., Liu, Y., 2005, Mixing Water Treatment Residual with Excavation Waste Soil in Brick and Artificial Aggregate Making, *J. Environ. Eng.*, Vol. 131, 272-277.
- [51] Anderson, M., Biggs, A., Winters, C., 2003, Use of Two Blended Water Industry Byproduct Wastes as a Composite Substitute for Traditional Raw Materials Used in Clay Brick Manufacture. In: *Proceedings of the International Symposium on Recycling and Reuse of Waste Materials*, Dundee, Scotland, UK.
- [52] Chiang, K.Y., Chou, P.H., Hua, C. R., Chien, K. L., Cheeseman, C., 2009, Lightweight Bricks Manufactured from Water Treatment Sludge and Rice Husks, *J. Hazard. Mater.*, Vol. 171, 76-82.
- [53] Elangovan, C., Subramanian, K., 2011, Reuse of Alum Sludge in Clay Brick Manufacturing, *Water Sci. Technol., Water Supply*, Vol. 11(3), 333-341.
- [54] Hegazy, B.D., Fouad, H.A., Hassanain, A.M., 2012, Brick Manufacturing from Water Treatment Sludge and Rice Husk Ash, *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, Vol. 6(3), 453-461.
- [55] Horth, H., Gendebien, A., Agg, R., Cartwright, N., 1994, Treatment and Disposal of Waterworks Sludge in Selected European Countries, In: *Foundation for Water Research Technical Reports No. FR 0428.*
- [56] Teixeira, S.R., Santos, G.T.A., Souza, A.E., Alessio, P., Souza, S.A., Souza, N.R., 2011, The Effect of Incorporation of a Brazilian WTPs Sludge on the Properties of Ceramic Materials, *Appl. Clay Sci.*, Vol. 53, 561-565.
- [57] Monteiro, S.N., Alexandre, J., Margem, J.I., Sanchez, R., Vieira, C.M.F., 2008, Incorporation of Sludge Waste from Water Treatment Plant into Red Ceramic, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 22, 1281-1287.
- [58] Vicenzi, J., Bernardes, A., Moura, B., Bergmann, C.P., 2005, Evaluation of Alum Sludge as Raw Material for Ceramic Products, *J. Ind. Ceram.*, Vol. 25(1), 7-16.

- [59] Titshall, L.W., Hughes, J.C., 2005, Characterization of Some South African Water Treatment Residues and Implications for Land Application, *J. Water SA*, Vol. 31(3), 299-307.
- [60] Russell, G.A., 1975, From Lagooning to Farm Land Application: The Next Step in Lime Sludge Disposal, *J. Am. Water Works Assoc.*, Vol. 67, 585-588.
- [61] Ippolito, J.A., Barabrick, K.A., Redente, E.F., 1999, Co-application Effects of Water Treatment Residuals and Biosolids on Two Range Grasses, *J. Environ. Qual.*, Vol. 28, 1644-1650.
- [62] Lombi, E., Stevens, D.P., McLaughlin, M.J., 2010, Effect of Water Treatment Residuals on Soil Phosphorus, Copper and Aluminum Availability and Toxicity, *Environ. Pollut.*, Vol. 158, 2110-2116.
- [63] Moodley, M., Johnston, M.A., Hughes, J.C., Titshall, L.W., 2004, Effects of a Water Treatment Residue, Lime, Gypsum, and Polyacrylamide on the Water Retention and Hydraulic Conductivity of Two Contrasting Soils under Field Conditions in KwaZulu-Natal, South Africa, *Aust. J. Soil Res.*, Vol. 42(3), 273-282.
- [64] Dayton, E.A., Basta, N.T., 2001, Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for Use as a Soil Substitute, *Water Environ. Res.*, Vol. 73(1), 52-57.
- [65] Lin, S.D., Green, C.D., 1987, A Study of Wastes from the Centralia Water Treatment Plant and Their Impact on Crooked Creek, Illinois State Water Survey Contract Report 419, 115-120.
- [66] Owen, P.G., 2002, Water-Treatment Work's Sludge Management, *J. Ciwem*, Vol. 16, 282-285.
- [67] Kim, G.J., Lee, S.S., Moon, H.S., Kang, I.M., 2002, Land Application of Alum Sludge from Water Purification Plant to Acid Mineral Soil Treated with Acidic Water, *Soil Sci. Plant Nutr.*, Vol. 48(1), 15-22.
- [68] Wang, F., Couillard, D., Auclair, J.C., Campbell, P.G.C., 1998, Effects of Alum-Treated Wastewater Sludge on Barley Growth, *Water Air Soil Pollut.*, Vol. 108(1-2), 33-49.
- [69] Hastings, E., Dawson, J.J.C., 2012, The Use of Alum Sludge and Sewage Sludge as a Soil Improver on Barra - Further Response, CREW Publication, Call Down Project (CD2012/16).
- [70] Stevens, D.P., Lombi, R., McLaughlin, M., Tomczak, B., Fiebigner, C., 2003, Risk Assessment for Water Treatment Residuals, Consultancy Report for SA Water and WA Water, CSIRO Land and Water, Glen Osmond, South Australia.
- [71] Rensburg, V.L., Morgenthal, T.L., 2003, Evaluation of Water Treatment Sludge for Ameliorating Acid Mine Waste, *J. Environ. Qual.*, Vol. 32, 1658-1668.
- [72] Moodley, M., Hughes, J.C., 2005, The effects of a Polyacrylamide-Derived Water Treatment Residue on the Hydraulic Conductivity, Water Retention and Evaporation of Four Contrasting South African Soils and Implications for Land Disposal, In: Proceedings of IWA Specialized Conference on Management of Residues Emanating from Water and Wastewater Treatment, Johannesburg, South Africa.
- [73] Elliot and Singer (1988) Elliot, H.A., Singer, L.M., 1988. Effect of water treatment sludge on growth and elemental composition of tomato shoots. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19 (3), 345-354.
- [74] Elliott, H.A., Dempsey, B.A., 1991, Agronomic Effects of Land Application of Water Treatment Sludge, *J. Am. Water Works Assoc.*, Vol. 83(4), 126-131.
- [75] Babatunde, A.O., Yang, Y., Zhao, Y.Q., 2005, Towards the Development of a Novel Wastewater Treatment System Incorporating Drinking Water Residual: Preliminary Results. In: Proceedings of the 10th European Conference on Biowastes and Biosolids Management, Yorkshire, UK.
- [76] Zhao, Y.Q., Babatunde, A.O., Hu, Y.S., Kumar, J.L.G., Zhao, X.H., 2011, Pilot Field-Scale Demonstration of a Novel Alum Sludge-Based Constructed Wetland System for Enhanced Wastewater Treatment, *Process Biochem.*, Vol. 46(1), 278-283.
- [77] Zhao, Y.Q., and Babatunde, A.O., 2006, Integrating "Wastes" into Treatment Processes: Can Dewatered Alum Sludge Be Used as Substrate in Constructed Reed Bed? 10th IWA Wetland Conference, September, Portugal.
- [78] Leader, J.W., Reddy, K.R., and Wilkie, A.C. 2005, Optimization of Low-Cost Phosphorus Removal from Wastewater using Co-Treatments with Constructed Wetlands, *Water Sci. Technol.*, 51(9), 283-290.

- [79] Zhao, Y.Q., Zhao, X.H., Babatunde, A.O., 2009, Use of Dewatered Alum Sludge as Main Substrate in Treatment Reed Bed Receiving Agricultural Wastewater: Long-Term Trial, *Bioresour. Technol.*, Vol. 100, 6446-48.
- [80] Park, W., 2009, Integrated Constructed Wetland Systems Employing Alum Sludge and Oystershells as Filter Media for P Removal, *Ecol. Eng.*, Vol. 35, 1275-1282.
- [81] Wu, S., Austin, D., Liu, L., Dong, R., 2011, Performance of Integrated Household Constructed Wetland for Domestic Wastewater Treatment in Rural Areas, *Ecol. Eng.*, Vol. 37, 948-954.
- [82] Babatunde, A.O., Zhao, Y.Q., Doyle, R.J., Rackard, S.M., Kumar, J.L.G., Hu, Y.S., 2011, Performance Evaluation and Prediction for a Pilot Two-Stage On-Site Constructed Wetland System Employing Dewatered Alum Sludge as Main Substrate, *Bioresour. Technol.*, Vol. 102(10), 5645-5652.
- [83] Zhao, X.H., Zhao, Y.Q., 2009, Investigation of Phosphorus Desorption from P Saturated Alum Sludge used as a Substrate in Constructed Wetland, *Sep. Purif. Technol.*, Vol. 66, 71-75.
- [84] Hu, Y., Zhao, Y., Zhao, X., Kumar, J.L., 2010, High Rate Nitrogen Removal in an Alum Sludge-Based Intermittent Aeration Constructed Wetland, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 46(8), 4583-4590.
- [85] Yang, Y., Zhao, Y.Q., Wang, S.P., Guo, X.C., Ren, Y.X., Wang, L., Wang, X.C.A., 2011, Promising Approach of Reject Water Treatment using a tidal Flow Constructed Wetland System Employing Alum Sludge as Main Substrate, *Water Sci. Technol.*, Vol. 63(10), 2367-2373.
- [86] Caniani, D., Masi, S., Mancini, I.M., Trulli, E., 2013, Innovative Reuse of Drinking Water Sludge in Geo-Environmental Applications, *Waste Manag.*, Vol. 33, 1461-1468.
- [87] Raghu, D., Hsieh, H., 1985, Feasibility Study of the Use of Lime Sludge as a Landfill Liner, *J. Indian Water Works Assoc.*, Vol. 17(2), 193-199.