




Endüstriyel Atık Çamurlardan Elde Edilen Vitrikiye Ürünlerle İlgili Bir Değerlendirme

An Evaluation of the Vitrified Products from Industrial Waste Sludges

Bengisu BOZKURT¹ , Zerrin GÜNKAYA¹ , Aysun ÖZKAN¹ , Göktuğ GÜNKAYA² , Müfide BANAR¹ 

¹ Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye
² Cam Bölümü, Güzel Sanatlar Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

Öz

Endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan arıtma çamurlarının geri kazanımı, arıtımı veya bertarafı tüm dünyada en önemli çevresel sorunlar arasındadır. Atık çamurların yönetiminde yaygın olarak kullanılan yakma, depolama, susuzlaştırma veya tarım alanlarında kullanma gibi yöntemler bu atıkların içerisindeki ağır metallerin uzaklaştırılmasında yetersiz kalmaktadır. Bu atıkların çevre için risk oluşturması ve arıtma maliyetleri gibi sorunların yanı sıra doğal kaynakların da her geçen yıl azaldığı düşünüldüğünde, oluşan atık çamurların değerlendirilerek ikincil malzemelere dönüştürülmesinin önemi artmaktadır. Bu bağlamda vitrifikasyon yöntemi, atıklardan yapı malzemeleri (cam-seramik, tuğla, pigment vb.) üretmenin yanı sıra atıkların içerisindeki ağır metallerin stabilizasyonunu da sağlayan, döngüsel ekonomi yaklaşımıyla örtüşen bir yöntem olarak dikkati çekmektedir. Bu makalede, endüstriyel arıtma çamurlarının katma değeri olan ürünlere dönüştürülmesi noktasında, arıtma çamurlarının vitrifikasyonu ve vitrikiye ürünlerin kullanım alanları ile ilgili çalışmalar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağır Metal, Atık Çamur, Stabilizasyon, Vitrifikasyon, Yapı Malzemeleri

Abstract

Recovery, treatment or disposal of sewage sludge resulting from industrial activities are among the most important environmental problems in the world. Common methods used in the management of waste sludge, such as incineration, landfilling, dehydration or use in agricultural areas, are insufficient in removing the heavy metals in these wastes. Considering that these wastes pose a risk to the environment and problems such as treatment costs and the decreasing of natural resources, the importance of recovery the waste sludge into secondary materials increases. In this context, vitrification method, which also provides the stabilization of heavy metals in wastes, draws attention as a method that applied to produce construction materials (glass-ceramic, brick, pigment, etc.) from these wastes in connection with the concept of circular economy. In this article, studies on vitrification of sewage sludge and usage areas of vitrified products were examined at the point of transforming industrial waste sludges into products with added value.

Keywords: Construction Materials, Heavy Metal, Stabilization, Vitrification, Waste Sludge

I. GİRİŞ

Hızla büyüyen dünya nüfusunun taleplerini karşılamak için artan endüstrileşme faaliyetleri ile birlikte atık oluşumu da hızla artmıştır [1,2]. Oluşan bu endüstriyel atıkların büyük bir miktarını atık çamurlar oluşturmaktadır. Bileşimi fazlasıyla kompleks olan ve ağır metaller gibi birçok farklı kirleticiyi de bünyesinde barındıran [3] atık çamurların bertaraf maliyetleri, işletmeleri gün geçtikçe daha da zora sokan bir durum haline gelmiştir [4]. 2017 yılında dünya genelinde ortaya çıkan toplam arıtma çamuru (kuru bazda) miktarının 45 milyon ton olduğu düşünüldüğünde, bu çamurların arıtılması ve bertarafının sağlanması konuları aciliyet kazanmış; giderek azalan hammadde kaynakları da göz önüne alınarak, döngüsel ekonomi kavramıyla bağlantılı şekilde bu atıkları hammadde olarak kullanma fikri gündeme gelmiştir [5,6].

Arıtma çamuru, inşaat sektöründe kullanılan kilin de bileşiminde bulunan SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 bileşiklerini bünyesinde barındırır. Bu kimyasal bileşimin benzerliği sayesinde, arıtma çamuru kil yerine kullanılabilir bir hammadde haline gelerek tuğla, seramik malzeme ve hafif agregalar gibi yapı malzemelerinin üretiminde kullanılabilir [7,8,9]. Ayrıca kilin dünyanın pek çok yerinde azalan hammadde kaynaklarından birisi olması ve eldesinin ortaya çıkardığı yüksek çevresel etki nedeniyle, geleneksel hammaddelerin yerine sürdürülebilir malzemelerin kullanılması gerektiği fikri önem kazanmıştır. Bu bağlamda başta Çin olmak üzere bazı ülkeler, tuğla kullanımına sınırlandırma getirerek, seramik ürünler elde etmek için endüstriyel atıkların kullanılmasını önermişlerdir [10]. Çevresel faktörlerin yanı sıra çimentoya olan talebin artması da inşaat sektörünü atık malzeme kullanımına yönlendirmiştir [11,12].

Çamur arıtımında kullanılan geleneksel yöntemleri yakma, depolama, stabilizasyon/solidifikasyon, inşaat malzemesi olarak kullanma oluşturmaktadır [13]. Ancak, atıkların düzenli depolanması için ayrılacak alanların sınırlı olması bu yöntem için kısıtlayıcı etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda, çamurun depolanması durumunda, içerisinde düşük miktarlarda da olsa bulunan ağır metallerin çevreye sızma riski devam etmektedir [14]. Yakma işlemi de ancak maliyeti fazla olan modern yakma tesislerinde gerçekleştirilebilmektedir [15].

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB)'nin entegre çevre bilgi sistemi bünyesindeki Atık Beyan Sistemini (TABS) kullanarak atık beyanında bulunan 66.478 adet tesisten sağlanan verilere göre, 2018 yılında ortaya çıkan atıkların 1.513.624 tonunu tehlikeli atıklar oluşturmaktadır. Bu tehlikeli atıklar içerisinde arıtma çamurlarının miktarı 110.605 tondur. ÇŞB tarafından yayınlanan Tehlikeli Atık İstatistikleri Bülteni (2020)'ne göre, beyan edilen toplam 1.513.624 ton tehlikeli atığın %84,99'u geri kazanılmak üzere atık işleme tesislerine, %13,26'sı ise bertaraf edilmek üzere sterilizasyon, düzenli depolama ve yakma tesislerine gönderilmiş, %1,15'i stok, %0,60'ı ise ihraç edilmiştir [16].

Bu bağlamda, ülkemizdeki arıtma çamuru miktarının fazlalığı ve halen döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilememesi, bu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmuş ve ağır metal içerikli endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarından ikincil bir malzeme üretmek amacıyla uygulanan vitrifikasyon yöntemi ve bu yolla elde edilen vitrifiye ürünlerin özellikleri ile ilgili çalışmalar incelenerek değerlendirme yapılmıştır. Çalışmanın, gelecekte yapılacak uygulamalar için bir temel oluşturması hedeflenmiştir.

II. VİTRİFİKASYON YÖNTEMİ

Bir stabilizasyon yöntemi olan vitrifikasyon ile atık bertarafı, 1950'lerde nükleer atıkların radyoaktif elementlerini immobilize etmek amacıyla uygulanmaya başlanmış olup [17] zamanla kullanım alanı genişletilerek diğer tehlikeli atık türleri için de kullanılabilir hale gelmiştir [18]. İşlem sonucu ortaya çıkan ve camsı veya kristal bir yapıda olan nihai ürün, sızmaya karşı dirençli, doğal granit veya mermerden daha dayanıklı özelliktedir [19].

Vitrifikasyon, kirlenmiş toprakları, gömülü tehlikeli atıkları ve toksik çamurları 1600 ila 2000 °C'ye kadar çıkabilen yüksek sıcaklıklardaki elektrikli bir fırında (ex-situ vitrifikasyon, ESV) ya da direkt olarak kirlenmiş bir sahada (in-situ vitrifikasyon, ISV) eriterek tehlikesiz hale getirme işlemi olarak tanımlanır. Bu teknoloji, kirlenmiş toprak veya çamurları, Joule kanununda belirtildiği şekilde elektrik akımının yarattığı ısı ile eriterek içerisindeki tehlikeli organik veya inorganik bileşenlerin yok edilmesi esasına dayanmaktadır [19].

Vitrifiye edilmiş atıklar üzerinde yapılan çalışmalar, elde edilen cam ürünün çimento da dahil olmak üzere diğer atık formlarına göre 10.000 kat daha dayanıklı olabileceğini ortaya koymuştur. ABD Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency, USEPA), vitrifikasyon yönteminin tehlikeli atıklar ve radyoaktif atıklar için "Mevcut En İyi Tekniklerden" (Best Available Techniques, BAT) biri olduğunu belirtmiştir [20].

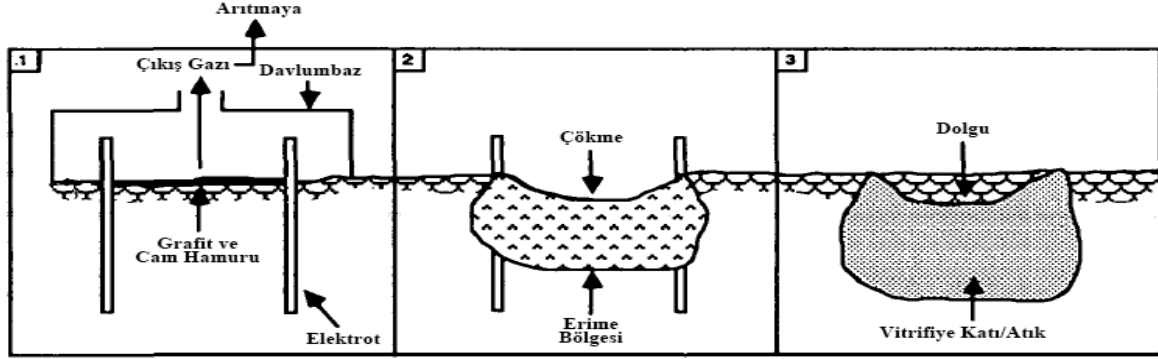
Yüksek enerji gerektirmesi sebebiyle pahalı olan bu süreç sonunda elde edilen güvenli ve çoğunlukla iyi mukavemet ve yalıtım değerlerine sahip olan ürünlerin pazarlanması ile üretim maliyetlerinin bir kısmını geri kazanmak mümkündür [21]. Vitrifikasyonun birçok avantajına rağmen maliyetinin fazla olması nedeniyle, tehlikeli atıkların stabilizasyonunda kullanımı kabul görmekte yavaş kalmıştır. Bu nedenle, içerisindeki ağır metalleri uzun vadede sızma riski olan çimentolu matrislerde sabitleme yöntemi, düzenli depolama sahalarında bertaraf ve hatta yasadışı giderme yöntemleri gibi daha kolay ve ucuz yollar tercih edilmiştir. Ancak, vitrifikasyon ile elde edilen cam ürünü atıl bir malzeme veya yalnızca düşük değerli uygulamalarda kullanılacak bir hammadde olarak değerlendirmek yerine katma değerli ve rekabetçi bir ürün olarak ele almak, maliyetlerin karşılanmasıyla birlikte kâr etmeyi de sağlayacaktır. Diğer yandan Avusturya'da nakliye dahil olmaksızın atık çamurun düzenli depolama ile bertaraf maliyetinin 130-200\$/ton, Hollanda'da yıllık 30-40 milyon Euro, İngiltere'de ise yıllık 5,5 milyon Euro [22] olması da atık çamurdan vitrifikasyon ile yeni ürünlerin eldesini alternatif bir yöntem olarak gündeme getirmektedir.

Vitrifikasyon sonrası nihai ürünün güvenilirliğini belirlemek amacıyla, Toksikite Karakteristik Liç Prosedürü (TCLP) geliştirilmiştir. Katı, sıvı ve çok fazlı atıklarda bulunan organik ve inorganik bileşenlerin hareketliliğini tespit etmek amacıyla geliştirilen TCLP [23], depolama sahasındaki bir atığın çevreye sızmasını simüle edecek şekilde tasarlanmış bir laboratuvar testidir. Bu teste göre, sıvı:katı oranı 20:1 olacak şekilde, katı faz uygun ekstraksiyon sıvısı ile 18±2 saat boyunca 30±2 rpm'de çalkalanarak ekstrakte edilir. Bu yöntem, atık içerisindeki ve vitrifikasyon sonrası stabilize olmuş ürünlerdeki metallerin sızma davranışı ve potansiyel çevresel riskleri hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar [24].

In-situ vitrifikasyon, kirlenmiş toprakları yerinde iyileştirme için kullanılan bir ısı işlem teknolojisidir. İşlem görecekle araziye kare oluşturacak şekilde yerleştirilen dört adet elektrot ile toprak elektriksel olarak ısıtılarak cam benzeri inert bir malzemeye dönüşümü sağlanır. Elektrotlar arasına ince bir tabaka halinde grafit ve cam hamurundan oluşan karışım yerleştirilerek başlangıçta elektriksel olarak iletken olmayan toprağın ısıtılması gerçekleştirilir. Vitrifiye

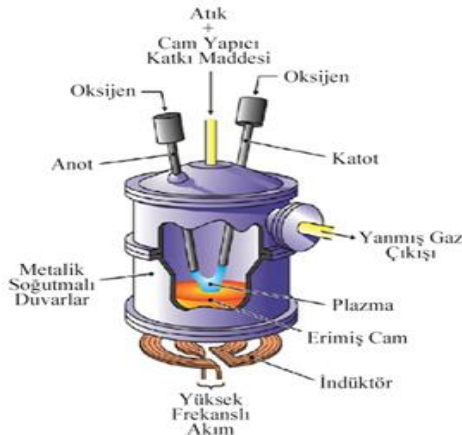
edilen alanı kapsayan davlumbaz sistemi ile işlem sırasında açığa çıkan gazlar çevreye salınmadan burada toplanır. ISV teknolojisi, çok çeşitli atık türleri (radyoaktif, organik veya inorganik) ile kirlenmiş toprakların, herhangi bir kazı ve nakliye olmaksızın direkt olarak o alanda iyileştirilmesine olanak sağlar

ve bu sayede oluşabilecek ekstra maliyetlerin de önüne geçilmiş olunur [25,26,27]. Tipik bir ISV arıtma işleminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. ISV sistemi [27]

Ex-situ vitrifikasyon teknolojisinde, kirlenmiş topraklara, tortulara ve çamurlara yapılan silis ilavesiyle bu malzemelerin elektrikli bir fırında oksit camlara dönüşümü sağlanır. Vitrifikasyonun başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, belirlenen atığa uygun cam bileşimlerinin geliştirilmesi ve bu atık ile katkı maddelerini tehlikeli emisyonlar oluşturmadan kararlı bir cama dönüştürebilen cam eritme teknolojisi gereklidir. Ex-situ vitrifikasyonda, tehlikeli atık içerisindeki inorganik bileşenler stabilize hale gelirken, bu işlemde kullanılan yüksek sıcaklık (1500 °C'nin üzerinde) sayesinde, atıkta bulunan antrasen, bis (2-etilheksil ftalat) ve pentaklorofenol de ayrıştırılır. Sonuç olarak, toksik bileşenler çevreye tehdit oluşturmayacak şekilde elde edilen ürün içerisinde sabitlenirler. Bu da, kimyasal olarak toksik olmayan camsı malzemeyi, yeniden kullanım veya güvenli bir şekilde depolama için uygun hale getirir [19,28,29]. ESV için kullanılan elektrikli fırın sistemi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektrikli fırın vitrifikasyon sistemi [30]

III. VİTRİFİYE ÜRÜNLER

Uygulanan vitrifikasyon yöntemi sonucu ortaya çıkan vitrifiye ürünleri elde etmede izlenen yol Şekil 3'te

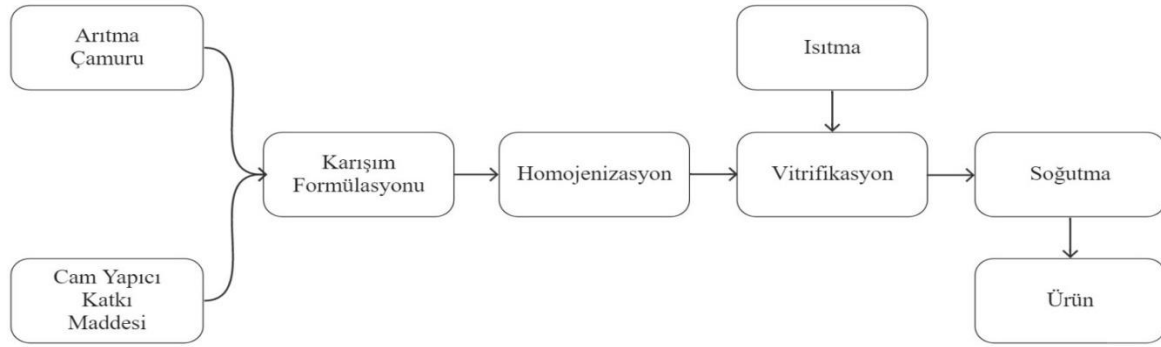
şematik olarak verilmiştir. Endüstriyel arıtma çamurlarından vitrifikasyon yöntemiyle elde edilen cam/cam seramik, seramik tuğla/briket, pigment ve diğer ürünler olmak üzere 4 başlıkta ele alınan uygulamalar özet olarak Tablo 1'de verilmiş, alt başlıklarda ise detaylı olarak incelenmiştir.

3.1. Cam/Cam-Seramik Ürünler

Doğal hammaddelerin, çeşitli endüstrilerden kaynaklanan ve büyük miktarlarda açığa çıkan atık çamurlar ile ikamesi cam ve cam-seramik ürünler elde etmede popülerlik kazanmıştır. Bu ürünler üretim koşullarına ve üretimde kullanılan malzemelere bağlı olarak, sıfır gözenekli bir yapıda olup, yüksek mekanik performansa sahip olabilir veya mükemmel yalıtım özellikleri gösteren fazlasıyla gözenekli bir yapı da sergileyebilirler [32].

Garcia-Valles vd. (2007), plastik ve metal yüzey işleme fabrikasından alınan galvanik çamur ile belediye atık su arıtma tesisinden alınan arıtma çamuru karışımının vitrifiye edilmesiyle elde ettikleri nihai ürünün fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Katma değerli bu ürünün kullanılabilirliğini görmek için doğal bir malzeme olan bazalt kaya, orijinal cam ve cam-seramik ile karşılaştırmışlar ve elde edilen cam-seramik malzemenin, doğal ve ticari ürünler yerine kullanılabilir özelliklere sahip rekabetçi bir ürün olduğunu belirtmişlerdir [33].

Silva vd. (2008) granit çamuru ve metal elektrokaplama tesisinden gelen galvanik atık ile gerçekleştirdikleri vitrifikasyon sonucunda, atık bileşiminde yüksek oranda bulunan demir iyonları sayesinde, ağırlıkça %30, %40 ve %50 atık katkılı camların çok yüksek derecede hidrolitik direnç gösterdiği ve en dirençli soda-kireç hidrolitik camlarına (yani şişe camı) benzer sabit bir çözünme hızına sahip olduğunu belirtmişlerdir [34].



Şekil 3. Vitrifikasyon ile arıtma çamurundan ürün eldesinin şematik gösterimi [31]

Tablo 1. Endüstriyel arıtma çamurlarına uygulanan vitrifikasyon çalışmaları

Kullanılan Arıtma Çamuru Türü	Ön İşlem	Elde Edilen Ürün/Olası Kullanım Şekli	Sızma Davranışı	Önemli Notlar	Kaynak
Galvanik çamur, altın madenciliği arıtma çamuru	Gerekli değil	Cam/Farklı renk ve özelliklerde cam	Düşük	SiO ₂ kaynağı olarak maden arıtma çamuru kullanımı ile hammaddelerin korunması, metal stabilizasyonu	[33]
Granit çamuru, metal elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Cam/Soda-kireç borosilikat cam	Düşük	Kimyasal olarak kararlı camların nispeten düşük bir sıcaklıkta (1100 °C'den fazla olmayan) dökülebilmesi	[34]
Ağır metal alçıtaşı, dekupaj çamuru	Tavsiye edilir	Cam/Yüksek dayanıma sahip cam	Düşük	Çamur bertarafı, ağır metal stabilizasyonu, endüstriyel üretim potansiyeli	[35]
Galvanik çamur, belediye atık su arıtma çamuru	Tavsiye edilir	Cam/Basınç dayanımı yüksek cam-seramik	Düşük	Doğal ve ticari ürünlerle ikamesi yapılabilecek rekabetçi bir ürün	[36]
Dekupaj çamuru, paslanmaz çelik çürufu, cam kırıntısı	Gerekli değil	Cam/İnşaat malzemesi olarak kullanım	Düşük	Dekupaj çamuru ilavesinin kristalizasyon sıcaklığını düşürmesi, yüksek mekanik özellikler	[37]

Cam atığı, asit nötralizasyon tuzları, arıtma çamuru	Tavsiye edilir	Cam/Basınç dayanımı yüksek cam-seramik	Düşük	Nihai ürünün geleneksel doğal malzemelere (kil ve kum) kıyasla maliyeti önemli ölçüde azaltması	[38]
<i>Galvanik çamur</i>	<i>Gerekli değil</i>	Cam/İnşaat sektöründe yalıtım malzemesi	Düşük	Tehlikesiz atık özellikleri taşıyan nihai ürün	[40]
Sodyum kromat çamur atığı	<i>Gerekli değil</i>	Cam/Bazalt cam-seramiklere benzer yüksek dayanıma sahip cam	Düşük	Çamur bertarafı, ağır metal stabilizasyonu, endüstriyel üretim potansiyeli	[41]
Magnox çamur atığı	Gerekli değil	Cam/Borosilikat cam	Düşük	Baz camın tek başına eritilmesi ile mullit potada meydana gelen hasarın Magnox çamur atığı ilavesi ile ortadan kalkması	[42]
Galvaniz çamur, atık cam	Gerekli değil	Tuğla/İnşaat sektöründe yapı malzemesi	Düşük	Atık cam ilavesi ile düşük su emilimi ve yüksek basınç dayanımı	[48]
Akü endüstrisinden kaynaklanan arıtma çamuru	Gerekli değil	Tuğla/İnşaat sektöründe yapı malzemesi	Düşük	Aynı sıcaklıkta ateşlenen geleneksel tuğlalara göre yaklaşık 1,5 kat fazla basınç dayanımı	[13]
Elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Tuğla/İnşaat sektöründe yapı malzemesi	Düşük	Çamur bertarafı, ağır metal stabilizasyonu, endüstriyel üretim potansiyeli	[49]
Atık su nötralizasyon sürecinden kaynaklanan Fe içerikli atık çamur	Gerekli değil	Tuğla/Isı yalıtım malzemesi	Düşük	Demir bazlı çamur sayesinde nispeten düşük sıcaklıklarda üretim	[39]

Cr/Ni/Cu kaplama çamuru	Tavsiye edilir	Pigment/Gri ve siyah renk veren pigment	Düşük	Nihai ürünün SO ₂ salınımı nedeniyle güvenlik endişesi	[50]
Elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Pigment/Sarı ve yeşil renk veren pigment	Düşük	Tüm numuneler için %99.99'dan fazla ağır metal stabilizasyon verimi	[51]
Elektrokaplama çamuru, endüstriyel kırmızı çamur	Gerekli değil	Pigment/Kahverengi ve siyah renk veren pigment	Düşük	Ticari pigmentlerle karşılaştırılabilir stabilite ve renklendirme gücü	[52]
Elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Külçe, cüruf/ Yol döşemesi veya yapı malzemesi	Düşük	Potansiyel ikincil kaynak niteliğinde nihai ürünler	[53]
Elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Külçe/Çelik üretim işlemlerinde katkı maddesi veya izabe tesislerine gönderim	Düşük	En az %95 metal geri kazanımı	[54]
Seramik çamuru, atık cam	Gerekli değil	Kil boru/İnşaat sektöründe yapı malzemesi	Düşük	Geleneksel üretime kıyasla 200 °C daha düşük sıcaklıkta ateşleme	[55]
Seramik çamuru, geri dönüştürülmüş cam	Gerekli değil	Seramik karo/Seramik karo üretiminde astar	Düşük	Seramik karo üretimi için gerekli olan maliyetin önemli ölçüde azalması	[56]

Pan vd. (2015), ağır metal alçı taşı ve dekapaj çamurundan elde ettikleri cam-seramiklerin 5,3 GPa'lık yüksek bir mikro sertlik, 206 MPa'dan daha yüksek bir eğilme mukavemeti ve %0,13'ün altında kalan su emme oranı ile iyi mekanik özellikler sergileyen ürünler olduğunu belirtmişlerdir [35].

Özdemir vd. (2011), metal kaplama tesisinden kaynaklanan galvanik çamur atığının cam üretiminde kullanım potansiyelini araştırmış ve 1350 °C'de gerçekleştirdikleri vitrifikasyon işlemi için SiO₂ kaynağı olarak başka bir atık olan altın madenciliği

arıtma çamurunu kullanmışlardır. Galvanik çamur katkısı ağırlıkça %10 ve %20 olacak şekilde işlem gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda koyu yeşil (%10) ve kahverengi-mor (%20) renkte iki farklı cam elde edilmiştir. Yapılan çamur ilavesi ile cam ürünün amorf özelliklerinin bozulmadığı; metal salınımının da USEPA limit değerlerinin altında kaldığı belirtilmiştir. Bu çalışma sonucunda, katkı maddelerinin miktarları değiştirilerek farklı renk ve özelliklerde cam ürünlerin geliştirilebileceği öne sürülmüştür [36].

Yang vd. (2016), paslanmaz çelik çürufu ve cam kırıntısından (çüruf/cam kırıntısı kütle oranı 0,78:1,00) oluşturdukları karışıma dekupaj atık çamurunu (Şekil 4) da belli oranlarda (ağırlıkça %0, %7, %14 ve %21) ekleyerek elde ettikleri cam-seramiklerin özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, %14'e kadar yapılan atık çamur ilavesi ile su absorpsiyonunda azalma olurken, yoğunlukta artma olduğu gözlemlenmiş, buna bağlı olarak dekupaj atık çamuru katkısının elde edilen cam-seramik üründe fiziksel ve mekanik özellikleri büyük ölçüde arttırdığı bildirilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda, liç testleri sonucunda cam-seramiklerdeki ağır metal konsantrasyonlarının USEPA limit değerlerinin çok altında kaldığı belirlenmiş ve bu dayanıklı nihai ürünlerin güvenle inşaat malzemesi olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır [37].

Mymrin vd. (2016), 1050 °C'de geleneksel yöntemlerle hazırlanan seramiklerin bükülme direnç değeri olan 4,7 MPa'ya karşılık, endüstriyel atıklardan elde edilen seramiğin (Şekil 4) bükülme direncini 18,4 MPa olarak bulmuşlardır [38].

Felisberto vd. (2018), galvanik çamurda bulunan kükürt ve karbonatların ayrışmasıyla açığa çıkan gazların cam matriste hapsolmesiyle, yoğunluğu düşük olan gözenekli yapılar elde etmişlerdir. Bu ürünlerin inşaat sektöründe yalıtım malzemesi olarak kullanıma uygun olduğu Starostina vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada [39] da kanıtlanmıştır [40].

Ballesteros vd. (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada, kromat atıklarının vitrifikasyonu ile elde edilen cam-seramiklerin mekanik davranışını incelemişler ve elde edilen ürünlerin mukavemetinin geleneksel cam-seramiklerin mukavemet değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır [41].

Tan vd. (2019) yaptığı çalışmada, yakıt depolama havuzlarından kaynaklanan ve içerdiği önemli miktarda Mg ile U elementleri nedeniyle orta seviyeli radyoaktif atık sınıfına giren, hem metalik hem de oksit/hidroksit fazları içeren Magnox çamur atığının stabil hale getirilmesi için büyük miktarlarda demir içeren borosilikat cam bileşimi geliştirmişlerdir. Kullanılan baz camın yüksek Al₂O₃ içeriği nedeniyle tek başına eritilmesi mullit potada hasara neden olmuş, ancak Magnox çamur atığının ilave edilmesi ile hasar büyük ölçüde engellenmiştir. Buna rağmen, %30'un üzerinde çamur ilavesinde gözlenen artık Mg parçacıklarının varlığı, atık yüklemesi arttıkça atıktaki bulunan Mg parçacıklarının hepsinin eriyik içinde çözünemeyeceğini düşündürmüştü ve atık yüklemesini sınırlandıran faktör olmuştur. Geliştirilen bu cam ürünün doğru işleme koşulları altında, içeriğindeki ağır metalleri bünyesinde tutabileceği ve güvenle kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır [42].

3.2. Seramik Tuğla/Briket

Tuğla veya briket üretimi için kil yerine alternatif olarak çeşitli endüstrilerden kaynaklanan ve büyük miktarlarda açığa çıkan atık çamurların kullanılması son yıllarda yapılan pek çok araştırmanın konusu olmuştur. Demir içerikli çamurun, elde edilen tuğlanın mekanik özellikleri ve işlem sıcaklığındaki azalma konusunda olumlu etkilere sahip olduğu belirtilmiştir [43,44,45]. Ayrıca birçok çalışma, tuğla karışımına çamur eklenmesinin su emiliminde bir azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur [46].

Bir başka çalışmada Weng vd. (2003), tuğla kalitesinin, kullanılan atık çamur miktarına ve ateşleme sıcaklığına bağlı olduğunu, çünkü bu iki faktörün tuğlaların büzülmesine, su emilimine ve basınç dayanımına etki ettiğini belirtmişlerdir [47].

Mao vd. (2019), %30'a kadar artan cam miktarı ve fırın sıcaklığı ile galvaniz çamur katkılı tuğlaların basınç mukavemetinin de arttığını gözlemlemişler ancak, 1050 °C sıcaklıkta ve %30 atık cam ilavesinde ağır metallerin sızabilirliğinin limit değerleri aştığını da belirtmişlerdir. Bu yüzden, bu çalışma için, 950 °C sıcaklıkta ağırlıkça %15 atık cam ile %10 galvaniz çamuru karışımı tuğla üretimi için optimum koşullar olarak belirlenmiştir [48].

Kulkarni vd. (2019) çalışmalarında, akü endüstrisinden kaynaklanan atık çamur ile hazırladıkları tuğlaların (Şekil 4) basınç dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. 1000 ve 1050 °C'de ateşlenen %5 çamur katkılı tuğlaların basınç dayanımının, aynı sıcaklıkta ateşlenen geleneksel tuğlaların basınç dayanımının sırasıyla 1,2 ve 1,36 katı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca CaO içeriğine sahip akü çamurunun, tuğlalara sarı ve bej ile açık kahverengi arasında renk verdiği saptanmış; beyaz veya sarı tuğlaların genellikle kırmızı tuğlalardan daha pahalı olması nedeniyle, akü çamuru ilavesinin tuğla üretiminde faaliyet gösteren endüstriler için kârlı olabileceği sonucuna varılmıştır [13].

Bunlara karşılık Zhang vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elektrokaplama çamurunun kil tuğla (Şekil 4) üretiminde hammadde olarak kullanım potansiyeli araştırılmış ve ağırlıkça %10'a varan çamur ilavesinin elde edilen ürünlerdeki basınç dayanımını 23,5 MPa'dan 15,5 MPa'ya düşürdüğü, su emilimini %2,7'den 3,46'ya çıkardığı ve görünür gözenekliliğin de artan çamur oranıyla birlikte %1,8'den %3,15'e yükseldiği belirlenmiştir. Elektrokaplama çamuru ilavesi, ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkilese de standartları karşıladığı için yeterli bulunmuştur. Bu çalışma için belirlenen optimum çamur ilavesi mekanik özellikler dikkate alındığında ağırlıkça %8'in altında kalmış olmasına rağmen, elektrokaplama çamurundan tuğla üretiminin, çamur bileşiminde bulunan ağır metallerin stabilizasyonunda etkili

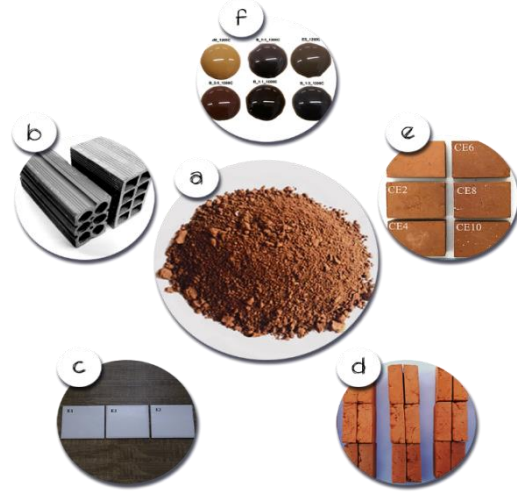
olacağı sonucuna varılmıştır [49]. Starostina vd. (2018) ise, atık suyun nötralizasyon işlemi sonucunda ortaya çıkan yüksek demir içerikli atık çamurları, seramik tuğla üretimi için ham yükün bileşiminde ağırlıkça %3 ila %30 oranında kullanmışlardır. Ancak artan çamur oranıyla birlikte seramik ürünlerdeki gözeneklilik de artmış, bu durum da fiziksel ve mekanik özelliklerin azalmasına neden olmuştur. Ham yüke ağırlıkça %5'e kadar yapılan çamur ilavesinin fiziksel ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemediği ve elde edilen ürünlerin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirdiği sonucuna varılmıştır [39].

3.3. Pigment

Estetik açıdan ürünün çekiciliğini arttıran ticari pigmentlerin kullanımının yerine bir atığın değerlendirilmesi fikri son derece caziptir. Bu noktadan hareketle Gargori vd. (2018), Cr/Ni/Cu kaplama çamur atığının 110 °C'de kurutulmasının ardından 1100 °C'de fırınlanmasıyla elde edilen pigmentlerin seramik endüstrisinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bunun sonucunda, atık çamurun kurutulmasıyla elde edilen pigmentlerin sır bünyelerine dahil edildiğinde kusurlara neden olduğunu; ancak 1100 °C'de fırınlanmış atık çamurdan elde edilen pigmentin sır bünyesinde herhangi bir kusura neden olmadığını ve sır gri ile siyah arasında değişen bir renk verdiğini bildirmişlerdir [50].

Mitiu vd. (2018), elektrokaplama çamurundan elde edilen çeşitli miktarlarda Cr ve Fe pigmentlerini, beyaz ve şeffaf sır bileşimlerine dahil ederek renkli seramik ürünler elde etmeyi amaçlamışlardır. Cr, Fe ve Zn'nin çözüldürülmesiyle gerçekleştirilen ekstraksiyon işlemi sonucunda yeşil krom pigmenti $[Cr(OH)_3]$, sarı krom pigmenti I ($PbCrO_4$), sarı krom pigmenti II ($BaCrO_4$) ve kırmızı demir pigmenti $[Fe(OH)_3]$ elde etmişlerdir. Bu pigmentleri farklı oranlarda sır bileşimlerine dahil ederek metal sızma değerleri izin verilenin altında kalan çevre dostu ürünler elde etmeyi başarmışlardır [51].

Carneiro vd. (2018) ise, seramik endüstrisinde kullanılan ticari pigmentlerin yerine endüstriyel atık olan kırmızı çamurun (RM (Red Mud)) ve elektrokaplama çamurunun (ES (Electroplating Mud)) farklı oranlarda (RM:ES = 1:1, 1:3, 3:1) karıştırılmasıyla elde edilecek pigment üretimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bunun sonucunda, RM:ES = 1:1 ve 1:3 oranlarında 1200 °C'de hazırlanarak elde edilen pigmentlerin, ilave edildikleri şeffaf sırlara (Şekil 4) sırasıyla kahverengi ve siyah renk vererek ticari pigmentlerle benzer renklendirme özelliklerine sahip oldukları belirlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmalar ile seramik endüstrisinde kullanılmakta olan ticari pigmentler yerine atık bazlı pigmentlerin de kullanılabilirdiği açıkça görülmüştür [52].



Şekil 4. Arıtma çamurundan elde edilen yapı malzemeleri (a: kurutulmuş arıtma çamuru [37], b: seramik blok [38], c: seramik karo [56], d: renkli tuğla [13], e: kil tuğla [49], f: elde edilen pigmentleri içeren şeffaf sırlar [52])

3.4. Diğer Ürünler

Atık çamurun cam/cam-seramik, tuğla/briket ve pigment elde etmek için vitrifiye edilmesinin dışında birkaç farklı uygulama tespit edilmiştir. Chou vd. (2012), elektrokaplama tesisinden çıkan atık çamur içerisindeki değerli metalleri vitrifikasyon yöntemi ile geri kazanmak için araştırmalar yapmışlardır. Gerçekleştirdikleri vitrifikasyon işleminin ana ürünleri "külçe" ve yoğunluk farkı nedeniyle külçe yüzeyinde biriken "cüruf" olmuştur. Bu çalışmanın sonucu olarak, çoğunlukla silika ve kalsiyumdan oluşan cürufun, yol döşemesi veya yapı malzemesi olarak yeniden kullanılabilirdiği ortaya konulmuştur [53].

Huang vd. (2013) de, bir elektrokaplama tesisinden çıkan atık çamura mümkün olduğunca az katkı maddesi (kireçtaşı ve cam kırıntısı) ilavesiyle değerli metallerin geri kazanımı üzerinde çalışmışlardır. Katkı maddesi/çamur oranı 0,2 olduğunda elde edilen külçe miktarı ağırlıkça %57,6 ile maksimum seviyeye ulaşmış ve bu oranda külçe içerisindeki metal geri kazanımının (Ni-Fe alaşımı şeklinde) %95'ten yüksek olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak elde edilen alaşımın daha fazla metal geri kazanımı için izabe tesislerine gönderilebileceği veya doğrudan çelik üretim işlemlerinde bir katkı maddesi olarak kullanılabilirdiği bildirilmiştir [54].

Bu çalışmalardan farklı olarak, Al Hoseny vd. (2018), kil boruları üretmek için iki farklı endüstriyel atık olan seramik çamur atığı ve atık cam kırıntısının birlikte kullanımını değerlendirmişlerdir. Kırılma katsayısı üretilmek istenen bu borularla ilgili en önemli husus olduğundan optimum koşullar (min. 1050 °C fırın sıcaklığı, min. 1 saatlik ısıtma süresi, şişkinliği önlemek için %5 cam atığı ile max. %6,2 çamur seviyesi) bu faktör göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Belirlenen koşullarda elde edilen

borunun kırılma katsayısının, toprağa gömülü herhangi bir boyuttaki boru ve beton kızağa gömülü $\geq 8''$ borular için minimum gereksinimi aşan eğilme mukavemeti gösterdiğini bildirmişlerdir [55].

Nandi vd. (2015), seramik karo üretim endüstrisinden kaynaklanan seramik çamuru ile geri dönüştürülmüş camın birlikte değerlendirilerek seramik karo üretiminde (Şekil 4) astar olarak kullanılabilme potansiyelini incelemişlerdir. Bu karışıma kireçtaşı, dolomit, uleksit (beyaz veya saydam bir borat minerali) ve potasyum nitrat hammadde olarak eklenerek 3 farklı formülasyon hazırlanmış ve içlerinde en yüksek seramik çamuru içeriğine sahip astar numunesi endüstriyel bir teste tabii tutulmuştur. Ticari ürünler baz alındığında, elde edilen ürünün sırlı seramik karoların üretiminde güvenle kullanılabilceği ortaya konmuştur [56].

IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Arıtma çamuru yönetimi, çevresel anlamda çözüm gerektiren önemli bir sorundur. Bununla birlikte, oluşan bu çamurların yapısında Fe, Al ve Ca başta olmak üzere çimento harçlarına ve ticari olarak kullanılan diğer yapı malzemelerine oksitler şeklinde eklenen pek çok değerli bileşiğin bulunması, hızla tükenen hammadde kaynaklarının ikamesine olanak sağlamaktadır. Oluşan atık çamurlardan ürün (cam/cam-seramik, tuğla/briket vb.) elde etmek için kullanılan vitrifikasyon işlemi, çamurun hammadde şeklinde geri kazanımına olanak sağlarken, aynı zamanda atık içerisindeki ağır metallerin stabilizasyonunu da gerçekleştirir. Diğer yöntemlere kıyasla fazla enerji kullanımına bağlı olarak artan maliyetler, elde edilen ürünün ticari olarak satışının gerçekleştirilmesiyle birlikte azaltılabilir. Bu yöntem, bileşimi karmaşık olan çok çeşitli atıklara uygulanabilir olmasıyla da dikkat çekicidir. Vitrifikasyon yönteminde kullanılan ısı işleminin neredeyse tüm organik bileşikler yok etme kabiliyeti sayesinde, atıkların bileşiminde bulunan, miktar ve çeşitlilik bakımından inanılmaz boyutlara ulaşabilen kirleticilerin belirlenmesi ve uygun atık bertaraf yönetiminin seçilmesi için harcanacak zaman ve maliyetten de tasarruf sağlanmış olunur. Bununla birlikte, arıtma çamurlarından yapı malzemeleri elde etmede kullanılacak tek bir metot geliştirmek mümkün değildir. Her bir arıtma çamurunun vitrifikasyonu için gerekli optimum şartlar kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişecektir. Bu durum elde edilen malzemenin fiziksel ve mekanik yapısını da etkileyecektir. Arıtma çamurlarının yapı malzemeleri olarak kullanımındaki temel zorluk, artan çamur miktarı ile elde edilen üründe azalan dayanıklılık, artan gözeneklilik ve buna bağlı olarak su emme kapasitesindeki artış şeklindedir. Ancak bu durum üretilen malzemelerin kullanımının mümkün olmadığı anlamını taşımamaktadır. Ürünlerin doğru şekilde kategorize edilmesi ve uygun fiyatlandırılması ile kendine uygulama alanı bulması mümkündür. Buna

karşılık, içeriğinde yüksek oranda demir bulunan atıkların vitrifikasyonu ile elde edilen ürünlerde basınç dayanımı artarken, su emme kapasitesinde azalma meydana gelerek olumlu bir etkiye sahip olduğu yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Tüm bunların yanı sıra, üretilen malzemelerin çevre için risk oluşturmaması da kullanılabilir olması açısından en önemli etkenlerden biridir. İncelenen çalışmaların tümünde ağır metaller başarılı bir şekilde elde edilen ürün içerisinde hapsolmüştür. Sızma olsa dahi bu konsantrasyonlar limit değerlerinin altında kaldığından ihmal edilmektedirler. Sonuç olarak bu çalışma ile farklı endüstriyel proseslerden kaynaklanan atık çamurların başarılı bir şekilde vitrifiye edilerek, döngüsel ekonomi kavramına da uyacak şekilde inşaat sektöründe kullanılmak üzere katma değerli ürünlere dönüşebileceği ortaya konmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı (Proje No: 20ADP186 ve TÜBİTAK (Proje No: 120Y059) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Christodoulou, A. ve Stamatelatos, K. (2016). Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water Sci. Technol*, 73, 453–462.
- [2] Yang, G., Zhang, G. ve Wang, H. (2015). Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. *Water Res*, 78, 60–73.
- [3] Zaker, A., Chen, Z., Wang, X. ve Zhang, Q. (2019). Microwave-assisted pyrolysis of sewage sludge: a review. *Fuel Process. Technol*, 187, 84–104.
- [4] Maiden, P., Hearn, M., Boysen, R., Chier, P., Warnecke, M. ve Jackson, W. (2015). Alum Sludge Re-Use, Investigation (10OS-42) Prepared by GHD and Centre for Green Chemistry (Monash University) for The Smart Water Fund. Victoria, ACTEW Water & Seawater, Melbourne, Australia.
- [5] Zhang, Q., Hu, J., Lee, D.-J., Chang, Y. ve Lee, Y.-J. (2017). Sludge treatment: current research trends. *Bioresour. Technol*, 243, 1159–1172.
- [6] Lynn, C.J., Dhir, R.K. ve Ghataora, G.S. (2016). Sewage sludge ash characteristics and potential for use in bricks, tiles and glass ceramics. *Water Sci. Technol*, 74, 17–29.
- [7] Gherghel, A., Teodosiu, C. ve De Gisi, S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *J. Cleaner Prod.*
- [8] Lynn, C.J., Dhir, R.K., Ghataora, G.S. ve West, R.P. (2015). Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Constr. Build. Mater*, 98, 767–779.

- [9] Świerczek, L., Cieřlik, B. M. ve Konieczka, P. (2018). The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review. *Journal of Cleaner Production*, 200, 342–356.
- [10] Chen, Y., Zhang, Y., Chen, T., Zhao, Y. ve Bao, S. (2011). Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings. *Constr. Build. Mater*, 25 (4), 2107–2111.
- [11] Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K. ve Wzorek, Z. (2015). The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *J. Clean. Prod*, 95, 45–54.
- [12] Supino, S., Malandrino, O., Testa, M. ve Sica, D. (2016). Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. *J. Clean. Prod*, 112, 430–442.
- [13] Kulkarni, V. V., Golder, A. K. ve Ghosh, P. K. (2019). Production of composite clay bricks: A value-added solution to hazardous sludge through effective heavy metal fixation. *Construction and Building Materials*, 201, 391–400.
- [14] Salan, T. (2014). Atıksu Arıtma Çamurlarının Türkiye'deki Durumu ve Enerji Üretiminde Değerlendirilme Olanakları. *ICCI 2014, Conference Paper*, 190–195.
- [15] Mininni, G., Blanch, A., Lucena, F. ve Berselli, S. (2015). EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 22 (10), 7361–7374.
- [16] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2020). 2018 Yılı Tehlikeli Atık İstatistikleri Bülteni.
- [17] Jantzen, C. M. (2011). Historical development of glass and ceramic waste forms for high level radioactive wastes. *Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies*, 159–172.
- [18] Bernardo, E., Scarinci, G. ve Colombo, P. (2017). Vitriification of Waste and Reuse of Waste-Derived Glass. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 1–34.
- [19] Climate Policy Watcher, Ex Situ And In Situ Vitriification, <https://www.climate-policy-watcher.org/industrial-wastes/ex-situ-and-in-situ-vitriification.html>, (Nisan 2021).
- [20] Meegoda, J. N., Ezeldin, A. S., Fang, H.-Y. ve Inyang, H. I. (2003). Waste Immobilization Technologies. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 7(1), 46–58.
- [21] Cieřlik, B.M., Namieřnik, J. ve Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *J. Cleaner Prod*, 90, 1–15.
- [22] De Carvalho Gomes, S., Zhou, J. L., Li, W. ve Long, G. (2019). Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 148–159.
- [23] USEPA (1992). SW-846 Test Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP).
- [24] Tang, Y., Wu, P., Shih, K. ve Liao, C. (2019). Industrial sludge for ceramic products and its benefit for metal stabilization. *Industrial and Municipal Sludge*, 253–293.
- [25] Buelt, J. L. ve Farnsworth, R. K. (1991). In Situ Vitriification of Soils Containing Various Metals. *Nuclear Technology*, 96(2), 178–184.
- [26] Byers, M. G., FitzPatrick, V. F. ve Holtz, R. D. (1991). Site Remediation by In Situ Vitriification. *Transportation Research Record*, 1312, 162–166.
- [27] USEPA (1989). Innovative Technology: In-Situ Vitriification. *Solid Waste and Emergency Response*, Directive 9200.5-251FS.
- [28] Climate Policy Watcher, Electric Furnace Vitriification System, <https://www.climate-policy-watcher.org/industrial-wastes/figure-5-electric-furnace-vitriification-system-courtesy-of-usepa.html>, (Nisan 2021).
- [29] Bernardo, E. ve Dal Maschio, R. (2011). Glass–ceramics from vitriified sewage sludge pyrolysis residues and recycled glasses. *Waste Management*, 31(11), 2245–2252.
- [30] Vernaz, E., Gin, S. ve Veyer, C. (2012). Waste Glass. *Comprehensive Nuclear Materials*, 5, 451–483.
- [31] Borowski, G. (2012). Suitability Tests of Fly Ashes Vitriification from Sewage Sludge Incineration. *Archives of Environmental Protection*, 38(2).
- [32] Chinnam, R.K., Francis, A.A., Will, J., Bernardo, E. ve Boccaccini, A.R. (2013). Review. Functional glasses and glass-ceramics derived from iron rich waste and combination of industrial residues. *J. Non Cryst. Solids*, 365, 63–74.
- [33] Garcia-Valles, M., Avila, G., Martinez, S., Terradas, R. ve Nogués, J. M. (2007). Heavy metal-rich wastes sequester in mineral phases through a glass–ceramic process. *Chemosphere*, 68(10), 1946–1953.
- [34] Silva, A. C., Mello-Castanho, S., Guitian, F., Montero, I., Esteban-Cubillo, A., Sobrados, I., Sanz, J. ve Moya, J. S. (2008). Incorporation of Galvanic Waste (Cr, Ni, Cu, Zn, Pb) in a Soda–Lime–Borosilicate Glass. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(4), 1300–1305.
- [35] Pan, D. A., Li, L. J., Yang, J., Bu, J. B., Guo, B., Liu, B., Zhang, S. G. ve Volinsky, A. A. (2015). Production of glass–ceramics from heavy metal gypsum and pickling sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 3047–3052.
- [36] Özdemir, Ö.D., Figen, A.K. ve Piřkin S. (2011). Utilization of Galvanic Sludge as Raw Material

- for Production of Glass. *International Conference on Chemistry and Chemical Process*, 10, 45–49.
- [37] Yang, J., Zhang, S.-G., Pan, D.-A., Liu, B., Wu, C.-L. ve Volinsky, A. A. (2016). Treatment method of hazardous pickling sludge by reusing as glass–ceramics nucleation agent. *Rare Metals*, 35(3), 269–274.
- [38] Mymrin, V., Alekseev, K., Catai, R. E., Nagalli, A., Aibuldinov, Y. K., Bekturganov, N. S., Rose, J. L. ve Izzo, R. L. S. (2016). Red ceramics from composites of hazardous sludge with foundry sand, glass waste and acid neutralization salts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 753–761.
- [39] Starostina, I., Simonov, M., Volodchenko, A., Starostina, Y., Fomin, A. ve Fokina, E. (2018). The usage of iron-containing sludge wastes in ceramic bricks production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 365, 032066.
- [40] Felisberto, R., Santos, M. C., Arcaro, S., Basegio, T. M. ve Bergmann, C. P. (2018). Assessment of environmental compatibility of glass–ceramic materials obtained from galvanic sludge and soda–lime glass residue. *Process Safety and Environmental Protection*, 120, 72–78.
- [41] Ballesteros, S., Rincón-Mora, B., Jordán, M.M. ve Rincón, J.Ma. (2019). Vitrification of a sodium chromate waste and mechanical properties of a final glass-ceramic. *Materials Letters: X*, 100025.
- [42] Tan, S., Kirk, N., Marshall, M., McGann, O. ve Hand, R. J. (2019). Vitrification of an intermediate level Magnox sludge waste. *Journal of Nuclear Materials*, 515, 392–400.
- [43] Anderson, M., Biggs, A. ve Winters, C. (2003). Use of two blended water industry by-product wastes as a composite substitute for traditional raw materials used in clay brick manufacture. *Recycling and Reuse of Waste Materials*, 417–426.
- [44] Teixeira, S., Santos, G., Souza, A., Alessio, P., Souza, S. ve Souza, N. (2011). The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Appl. Clay Sci*, 53 (4), 561–565.
- [45] Kizinievič, O., Žurauskienė, R., Kizinievič, V. ve Žurauskas, R. (2013). Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Constr. Build. Mater*, 41, 464–473.
- [46] Wolff, E., Schwabe, W.K. ve Conceição, S.V. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. *J. Clean. Product*, 96, 282–289.
- [47] Weng, C.-H., Lin, D.-F. ve Chiang, P.-C. (2003). Utilization of sludge as brick materials. *Adv. Environ. Res*, 7 (3), 679–685.
- [48] Mao, L., Wu, Y., Zhang, W. ve Huang, Q. (2019). The reuse of waste glass for enhancement of heavy metals immobilization during the introduction of galvanized sludge in brick manufacturing. *Journal of Environmental Management*, 231, 780–787.
- [49] Zhang, M., Chen, C., Mao, L. ve Wu, Q. (2018). Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation. *Construction and Building Materials*, 159, 27–36.
- [50] Gargori, C., Prim, S. R., LLusar, M., Folgueras, M. V. ve Monrós, G. (2018). Recycling of Cr/Ni/Cu plating wastes as black ceramic pigments. *Materials Letters*, 218, 341–345.
- [51] Mituiu, M.A., Marcus, M.I., Vlad, M. ve Balaceanu, C.M. (2018). Stability of Ceramic Glazes Obtained by Valorification of Anorganic Pigments Extracted from Electroplating Sludge. *Revista de Chimie*, 69(3), 571–574.
- [52] Carneiro, J., Tobaldi, D. M., Capela, M. N., Novais, R. M., Seabra, M. P. ve Labrincha, J. A. (2018). Synthesis of ceramic pigments from industrial wastes: Red mud and electroplating sludge. *Waste Management*, 80, 371–378.
- [53] Chou, I.-C., Kuo, Y.-M., Lin, C., Wang, J.-W., Wang, C.-T. ve Chang-Chien, G.-P. (2012). Electroplating sludge metal recovering with vitrification using mineral powder additive. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 45–49.
- [54] Huang, R., Huang, K.-L., Lin, Z.-Y., Wang, J.-W., Lin, C. ve Kuo, Y.-M. (2013). Recovery of valuable metals from electroplating sludge with reducing additives via vitrification. *Journal of Environmental Management*, 129, 586–592.
- [55] Al Hoseny, N. F., Amin, S. K., Fouad, M. M. K. ve Abadir, M. F. (2018). Reuse of ceramic sludge in the production of vitrified clay pipes. *Ceramics International*, 44(11), 12420–12425.
- [56] Nandi, V. S., Raupp-Pereira, F., Montedo, O. R. K. ve Oliveira, A. P. N. (2015). The use of ceramic sludge and recycled glass to obtain engobes for manufacturing ceramic tiles. *Journal of Cleaner Production*, 86, 461–470.