

Çimento harcı içerisinde kullanılan atık döküm kumunun çevresel risklerinin ve harç mekanik özelliklerine olan etkilerinin değerlendirilmesi

Evaluation of the environmental risks of the waste casting sand used in cement mortar and its effects on the mechanical properties of the mortar

Derya AZAK TÜZÜN¹ , Derya ÖVER KAMAN^{2*} , Serdar GÖNCÜ³ 

^{1,3}Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
azakderya@gmail.com, sgoncu@eskisehir.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
deryaover@eskisehir.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.09.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 16.12.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 05.12.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.12571
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Dökümcülük, metalleri işlemek ve metalleri şekil verme konusunda yüzyıllardır kullanılan önemli endüstri dallarından biridir. Döküm yöntemi ile üretilen malzemeler, kuyumculuktan, ağır sanayi tezgâhlarına, tarım makinelerinden, gemi makinelerine kadar çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Dökümcülüğün geniş pazar payından dolayı çeşitli üretim proseslerinden çıkan atık miktarı oldukça fazladır. Düzenli depolama sahalarının kritik doluluk oranı, tehlikeli atıkların bertaraf maliyeti endüstriyel simbiyoz ihtiyacını arttırmaktadır. Buna bağlı olarak, söz konusu atıkların beton ve harç içerisinde değerlendirilmesi konusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışma, inşaat sektöründe atığın geri dönüştürülerek kullanımı ile endüstriyel simbiyozu sağlamayı ve atığın çevresel etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, çimento harcı kompozisyonu içerisinde bulunan Standart kum, ağırlıkça %0 (referans), %10, %20, %30, %40 oranlarındaki atık döküm kumu (ADK) ile ikame edilerek ASTM C109 standardına uygun olarak harç karışımları hazırlanmıştır. Üretilen numunelerin üç farklı kür ortamında çevresel etkisi ve sızma davranışları incelenmiştir. ADK içeren harç numunelerinin çevresel etkilerinin yanı sıra mekanik özellikleri de incelenmiştir. ADK'nun fiziksel ve çevresel açıdan etkileri incelendiğinde, sonuç olarak olumsuz bir etkisinin olmadığı ve harç üretiminde ince agrega yerine %20 oranında kullanılabileceği görülmüştür. Numunelerin basınç dayanımı değerleri de standartlarda ifade edilen koşulları sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Ağır metal, Atık döküm kumu, Atık değerlendirme, Çevresel etki, Endüstriyel simbiyoz, Sızma davranışı.

Abstract

Casting is an important industrial process that used for metal processing and metal shaping. Materials produced by casting are used in several fields like jewelry, industrial benches, agricultural machines etc. Due to the large market share of the casting, the amount of waste from various production processes is quite high. Critical occupancy rate of landfill areas and the cost of disposal of hazardous wastes increase the need for industrial symbiosis. Accordingly, various studies are carried out to evaluate the wastes in concrete and mortar. This study aims to provide industrial symbiosis by recycling of waste in the construction sector and to investigate the environmental effects of waste. In this context, mortar mixtures were prepared in accordance with ASTM C109 standard by replacing the standard sand used in the cement mortar composition with 0% (reference), 10%, 20%, 30% and 40% by weight of waste casting sand (WCS). Environmental effects and leaching behaviors of the samples were investigated in three different curing environments. In addition to the environmental effects of mortar samples containing ADK, their mechanical properties were also investigated. As a result, it was concluded that ADK could be used 20% instead of fine aggregate in mortar production without causing a negative physical and environmental impact. The compressive strength values of the samples also satisfy the conditions stated in the standards.

Keywords: Heavy metal, Waste casting sand, Waste utilization, Environmental impact, Industrial symbiosis, Leaching behavior.

1 Giriş

Dökümhanelerden ve döküm işleminden kaynaklı fazla miktarda meydana çıkan atık döküm kumunun düzenli depolama sahalarına gönderilmesi sureti ile bertarafı yerine çevre dostu yöntemlerle yeni ürünlerde hammadde kaynağı olarak kullanılması ve bundan ekonomik kazanç sağlanması gelişmiş ülkelerde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Atık döküm kumu, silis içermesi sebebiyle çimento fabrikalarında nadiren hammadde olarak kullanılmaktadır. (örnek olarak Akçansa Çimento AŞ.) Bunun yanında, parke, bordür ve kaldırım taşı yapımında ve beton park bahçe mobilyaları üretiminde de kısıtlı miktarda değerlendirildiği ifade edilmiştir [1].

ADK bertarafı genel olarak tekrar değerlendirme imkanına sahip olmadan katı atık tesislerinde depolanması suretiyle yapılmaktadır. Depolama maliyetinin artması ve özellikle büyükşehirlerde depolama alanlarının yetersiz kalması, döküm sektörü için ciddi bir sorundur. Bu nedenlerden dolayı ADK'nın düzenli depolama tesislerine gönderilmesi suretiyle bertarafı yerine tekrar değerlendirilmesi; üretim maliyetlerinde ve atık miktarının azaltılması sonucunda atık bertaraf maliyetlerinde kayda değer bir kazanç oluşturacaktır [2]. Ekonomik fayda ve sürdürülebilirlik amacıyla, farklı sektörler arası kaynakların paylaşımı ya da bir sektörde ortaya çıkan atığın, diğer bir sektörde hammadde olarak kullanımının sağlanması, endüstriyel simbiyoz olarak tanımlanmıştır [3].

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Bu çalışmanın amacı, ADK'nın yapı sektöründe kullanılması sonucu farklı ortamlarda oluşturacağı çevresel etkinin yanında, ADK kullanımı ile hazırlanan çimento harçlarının mekanik özelliklerinin test edilerek, hem çevresel boyutta hem de inşaat sektöründe atık döküm kumunun kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Böylece, atık döküm kumunun inşaat sektöründe kullanımı ile hem atık bertaraf maliyetlerinin azaltılması hem de çevre sektörü ve inşaat sektörü arasında endüstriyel simbiyozun oluşturulması amaçlanmıştır.

1.1 Döküm sektörü

Pik demir, hurda çelik ve demirli alaşımların ark, endüksiyon veya kupol ocaklarında eritilerek kum, metal veya seramik kalıplarda biçimlendirilmesiyle birlikte, endüstri ve sanayinin ihtiyaç duyduğu pik, çelik, sfero ve temper döküm ürünlerinin ham olarak veya işlenmiş olarak üretildiği sanayi sektörü, döküm sektörü olarak adlandırılır [4],[5]. Metal döküm işlemleri dökümhanelerin %85'i tarafından yapılmaktadır [6]. Döküm işleminde genelde kalıp yapımı için silika kum, bağlayıcı madde ve sertleştirici karışımı kullanılmaktadır [7]. 2007 yılı üretimlerine bakıldığında %72 fabrika, % 28 atölye düzeyindeki iş yerlerinden toplam 1 294 500 ton üretim yapılmıştır. Bu üretimler sonucunda proseslerden yaklaşık 450 000 ton atık oluşmaktadır. Bu miktarın yaklaşık %65'i kum, %10'u cüruf, %15'i toz-çamur ve %10'u Refrakter, yağ, taş, boya, varil gibi atıklar oluşturmaktadır. Toplamda yıllık olarak 292 500 ton kum çıkmaktadır [8]. Döküm kumu maça kalıba dökülür ve ıskartaya çıkan kalıplar, çapaklar "atık döküm kumu (ADK)" olarak dökümhaneden uzaklaştırılır. 1 Ton dökümde yaklaşık 1000 kg maça kumu atığı çıkmaktadır. European Waste Catalogue (EWC) kodu atıkları kaynaklarına göre sınıflandırmak ve en uygun geri kazanım, geri dönüşüm bertaraf işlemlerini bulmak için Avrupa Birliği'nin kullandığı ve Türkiye'nin de kabul ettiği sistemdir. Oluşan ADK atıkları genel olarak "10 10 08:10 10 07 dışındaki döküm yapılmış maça ve kum döküm kalıpları" kapsamında tedarikçi firma aracılığı ile bertaraf edilmektedir [9].

Atık döküm kumu içerisinde bulunan, krom, nikel, kurşun, civa gibi ağır metallerin, ADK'nın uygun olmayan koşullarda depolanması ve çevresel koşullara maruz kalması neticesinde, bünyesindeki bu ağır metallerin çözünür forma dönüşerek sucul sistemlere ulaşması mümkündür. Sucul ekosistem için toksik etkiler yaratan bu kirleticilerin etkilerinin en aza indirilmesi için ağır metal salınımlarının minimize edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, her ne kadar bazı ADK'ları tehlikeli atık sınıfına girmese bile, uygun olmayan çevresel koşullar neticesinde sonraki tarihlerde ağır metal kirlilikleri oluşturabilirler [10]. Atık döküm kumunun özellikleri: Döküm sektöründen çıkan atık döküm kumunun özellikleri prosenin şekline ve içerisinde bulunduğu sanayi dalına bağlıdır. Döküm kumu genelde yarı-köşeli veya yuvarlak şekildedir, uniform bir tane boyutu dağılımına sahiptir. %85-95'i 0.6 mm ile 0.15 mm arasındadır, %5-12'si ise 0.075 mm'den küçüktür. Döküm kumunun özgül ağırlığı 2.39-2.55 arasındadır ve su emme özelliği oldukça düşüktür; ayrıca, non-plastiktir ve kimyasal bileşimi ergimiş metal cinsine, bağlayıcı çeşidi ve yakıta bağlıdır. Atık döküm kumu, ince film halinde yanmış karbonla kaplı silika kumu, bağlayıcı (bentonit, kömür, reçine/kimyasal vb.) ve tozlardan oluşmaktadır. Silika kumu hidrofiliktir ve suyu yüzeyine çeker.

1.2 Atık hiyerarşisine göre durum değerlendirmesi

Tehlikeli atıkları kaynağında tespit ederek sınıflandırma, bir araya getirme, geçici süreyle depolama, farklı sektörlerde

değerlendirme, transfer, bertaraf ve bertaraf sonrası kontrol işlemleri, "tehlikeli atık yönetimi" olarak adlandırılmaktadır [11]. Tehlikeli atık yönetiminde "Atık Yönetim Hiyerarşisi"nde belirtilen ve yönetimde tercih edilen öncelik sırasını ortaya koyan adımlar sırasıyla uygulanmalıdır [12]. Hiyerarşi ilk defa 75/442/EEC "Atık Çerçeve Direktifi" ile tanıtılmıştır [13]. 2008/98/EC sayılı "Yeni Atık Çerçeve Direktifi" ile revize edilmiştir. 2008/98/EC Direktifinin 4. maddesinde tanımlanmış olan hiyerarşiye göre atık yönetimde öngörülen öncelik sırası Şekil 1'de gösterilmiştir [14].



Şekil 1. Geleneksel atık-hedeflenen atık hiyerarşisi.

Figure 1. Waste hierarchy(Current)-Waste hierarchy(Targeted).

Gerçekleştirilen üretimin beraberinde oluşan atığın geri dönüşümü, tekrar kullanımı ve ikincil hammadde olarak kullanımını sağlamak üzere atığın çeşitli metotlar geri kazanımı veya enerji eldesi sağlamak üzere kullanılması esastır. Oluşan atık maddelerin çevresel etkileri düşük metotlar kullanılarak geri kazanılması ve farklı üretim sektörleri için ekonomik değeri olan ürünlere dönüştürülmesi; doğal kaynakların korunması, üretimde kullanılan hammaddenin daha az kullanılarak tasarrufun sağlanarak, ekonomiye katkı sağlanması, atık miktarının minimize edilerek çevrenin korunması, ve sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla ülkemiz açısından gerekliliktir. Oluşan ADK atıkları genel olarak European Waste Catalogue (EWC) kodu atıkları kaynaklarına göre sınıflandırma sistemine göre "10 10 08: 10 10 07 dışındaki döküm yapılmış maça ve kum döküm kalıpları" kapsamında tedarikçi firma aracılığı ile bertaraf edilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan atık döküm kumu, "10 10 07-Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları" atık kodu ile tehlikeli atık olarak bertaraf edilmektedir. Musluk bataryası üretimi yapılan bir firmadan çıkan atık döküm kumunun başka bir sektörde hammadde olarak kullanılması ve böylece çevresel boyutun indirgenmesi, maliyetin düşürülmesi öngörülmektedir. Bu kapsamda beton sektörü uygun görülmüştür ve bununla ilgili çevresel boyutlar incelenmiştir. Çevresel boyut anlamında uygunluk sağlanırsa endüstriyel simbiyoz gerçekleştirerek aynı zamanda şirkete kar sağlayan bir durum oluşturacağı düşünülmektedir.

1.3 Atık döküm kumunun inşaat sektöründe kullanımı

Literatürde, atık döküm kumunun inşaat sektöründe kullanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalarda genellikle atık döküm kumu, beton içeriğindeki doğal kum ile değişen oranlarda yer değiştirilerek kullanılmış ve dayanım ve dayanıklılık özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Kullanılan atık döküm kumu özellikleri değişkenlik göstermekle birlikte dayanıma olumsuz bir etkisinin olmadığı, aksine dayanıma olumlu katkıları olduğu yargısına varılmıştır [15]-[19]. Atık döküm kumu kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin daha geçirimsiz bir yapıda

olduğu, “hızlı klor iyonu geçirimsizlik deneyi” ve “ultrasonik dalga hızı deneyi” gibi yöntemler yardımıyla belirlenmiştir [20]. Buna bağlı olarak, atık döküm kumunun, beton dayanıklılığına olan etkilerini gözlemlemek adına hazırlanan numuneler, yüksek sıcaklık ve donma-çözülme gibi etkilere maruz bırakılmış ve referans numuneleri ile karşılaştırıldığında, belirgin bir olumsuz etkiye rastlanmadığı ifade edilmiştir [21].

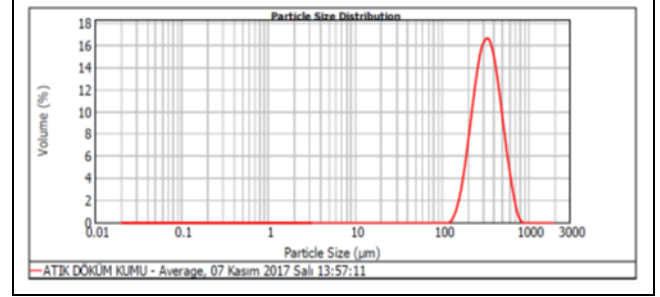
2 Materyal ve metot

2.1 Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri

2.1.1 Çalışmada kullanılan maça kumunun özellikleri

Çalışmada kullanılan atık döküm kumu armatür üreten bir firmadan temin edilmiştir. 2015 verilerine göre 1028 ton/yl üretimi olan fabrikanın 770 tonluk maça kumu atığı oluşmaktadır. Verilere göre hesaplama yapıldığında %75’lik bir ADK olduğu görülmektedir ve bu oldukça yüksek bir oran olup, bertarafı tehlikeli atık kapsamında yapıldığı için maliyeti yüksek ve çevresel boyutu (depolama alanı, bertaraf yöntemi) sorun teşkil etmektedir. Çalışmada kullanılan atık döküm kumu

ile ilgili daha önce başka bir laboratuvara yaptırılmış analiz sonuçları ve katı atık depolama tesisleri atık kabul kriterleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Atık döküm kumuna ait tane boyut analizi Marvern Particle Sizer M2000 ile yapılmış olup sonuçları ise Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Atık döküm kumu tane boyut dağılımı. (d10=212µm, d50=333 µm, d90=522 µm).

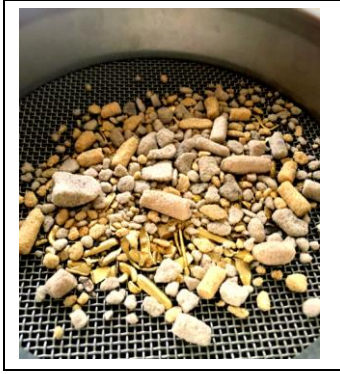
Figure 2. Partical size distribution of the waste casting sand.

Tablo 1. Atık döküm kumu analiz sonuçları.

Table 1. Chemical analysis result of waste casting sand.

PARAMETRELER	ANALİZ SONUCU	BİRİM	Numune Analiz Sonuçları			ANALİZ METODU
			II.Sınıf Depolama Tesisleri İçin Sınır Değerler	ILSınıf Depolama Tesisleri İçin Sınır Değerler	I.Sınıf Depolama Tesisleri İçin Sınır Değerler	
Eluat Kriterleri						
Antimon	<0.005	mg/L	0.006	0.07	0.5	SM 3111B
Arsenik	<0.01	mg/L	0.05	0.2	2.5	SM 3113 B
Bakır	0.02	mg/L	0.2	5	10	SM 3113 B
Baryum	<0.04	mg/L	2	10	30	SM 3113 B
Civa	<0.001	mg/L	0.001	0.02	0.2	TS EN 12457-4 EPA 200.7
Çinko	<0.1	mg/L	0.4	5	20	SM 3111 B
Florür	0.008	mg/L	1	15	50	SM 4110 B
Kadmiyum	0.002	mg/L	0.004	0.1	0.5	SM 3113 B
Klorür	7.8	mg/L	80	1500	2500	SM 4500-CF B
Krom	<0.005	mg/L	0.05	1	07	SM 3113 B
Kurşun	<0.02	mg/L	0.05	1	5	SM 3113 B
Molibden	<0.005	mg/L	0.05	1	0.3	SM 3113 B
Nikel	<0.02	mg/L	0.04	1	0.4	SM 3113 B
Selenyum	<0.01	mg/L	0.01	0.05	0.7	SM 3113 B
Sülfat	3.2	mg/L	100	2000	5000	SM 4500-S04-2 E
Orjinal Atıkta Bakılan Diğer Kriterler						
BTTX	0.26	mg/kg	6	-	-	EPA 502I A
Çözünmüş Organik Karbon*	6.23	mg/L	50	80	100	TS EN 12457-4 TS8195 EN
Fenol İndeksi	<0.1	mg/L	0.1	-	.	TS 6227 ISO 6439
Kızdırma Kaybı	0.98	%	-	-	10	TS EN 12179
Mineral Yağ	<40	mg/kg	500	-	-	TS EN 14039
pH	7.26	-	-	-	-	SM4500H+B
Toplam Çözünmüş Madde	30	mg/L	400	6000	10000	SM 2540 C
Toplan Organik Karbon*	<0.5	%	3	5	6	TS 12089 EN13137

Çevresel boyutların incelenmesi amacıyla atık karakterizasyonu yapılmış ve atığın içerisindeki metal miktarları belirlenmiştir. Atık karakterizasyonu için mikrodalga ile yakma yapılarak (EPA 3051A mikrodalga yakma [22] ve EPA 200.7 ICP-OES analizi [23]) ve Eluat analizi (TS EN 12457-4 eluat hazırlama, EPA 200.7 ICP-OES analizi [24]) ile ağır metal oranı mg/kg cinsinden hesaplanmıştır. Her iki yöntem için de fabrikanın atık olarak yıllık çıkardığı miktarlar baz alınarak %92 döküme girmiş yanık kum, %8 iskarta maça kumundan bir karışım hazırlanmıştır. Çözünmüş fazda ağır metal analizi için eluat şeklinde çalkalama yapılarak İndüktif Olarak Eşleşmiş Plazma ICP-OES Varian 720 ES cihazında, mikrodalga yakma ile yapılan analizler için ise Agilent ICP-MS MS QQQ cihazı ile okuma yapılmıştır. Atık döküm kumu içerisinde bulunan metallerin görseli Şekil 3'te gösterilmiştir. Atık döküm kumunun ağır metal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Atık Döküm Kumu içerisinde bulunan metal görseli.

Figure 3. Existing metal particles in waste casting sand

Tablo 2. Atık karakterizasyonu verileri.

Table 2. Characterisation of the waste.

Ağır Metal İçeriği		
Adı	Derişim (mg/kg) (Mikrodalga Ekstrasyon yöntemi ile)	Eluate Derişimi (mg/L)
Ag	3.09	0.0087
As	0.73	0.0122
B	18.28	0.0465
Cd	0.31	<LOD
Cr	13.88	0.00037
Cu	168.94	0.0236
Fe	466.42	0.0406
Hg	<LOD	<LOD
Mg	38.94	5.26
Mn	12.06	0.0125
Ni	3.45	0.0013
Pb	30.38	0.0149
Sb	<LOD	<LOD
Ti	88.72	0.0016
Zn	155.29	0.0768

*: LOD: Ölçüm alt limiti.

2.1.2 Çalışmada kullanılan standart kumun özellikleri

Çalışmada TS EN-196-1 [25] CEN standart kumu kullanılmıştır. CEN standart kumu 0.08 mm-2 mm aralığında bir tane boyut dağılımına sahiptir. Dolayısıyla ADK kumu, TS EN-196-1 CEN standart kumu ile yer değiştirilerek kullanıma uygundur.

2.1.3 Çalışmada kullanılan çimentonun ve suyun özellikleri

Çalışmada, tüm karışımlar hazırlanırken CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Böylece, çimento tipi parametresi, tüm karışımlar için sabit tutulmuştur.

Bütün karışımlarda, aynı kaynaktan temin edilen içilebilir su kullanılmıştır.

2.2 Test örneklerinin hazırlanması

Dökümler yapılırken ASTM C109 standardı [26] takip edilmiştir. Standartta göre, öncelikle başlangıç Su/Çimento oranı belirlenir. Harcın hedeflenen kıvam özelliğine bağlı olarak kullanılan su miktarında değişiklik yapmak mümkündür. Fakat bu çalışmada sabit bir su miktarı kullanmak daha doğru olacaktır. Portland çimentosu için verilen başlangıç Su/Çimento (S/Ç=0.485) oranına göre malzeme miktarları hesaplanmıştır. Test edilecek olan her bir parametre için dokuz adet numune dökülmüştür. Standartta göre dokuz numune için döküm oranı detaylı bir şekilde Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. ASTM C109 standardına göre döküm oranları.

Table 3. Mix compositions (According to ASTM C109 Standard).

ASTM C109 Standardına Göre Döküm Oranları			
	6 Numune	9 Numune	12 Numune
Çimento	500 g	740 g	1060 g
Kum	1375 g	2035 g	2915 g
Su	242 g	359 g	514 g

Çalışmada kullanılan atık döküm kumu içerisinde dökümden sonra metal parçaları kaldığı görülmüştür. Kalan metal parçalarını harc numuneleri içerisine homojen bir şekilde dağıtmak amacıyla, metaller hassas terazi ile tartılarak ince kum içerisine belirlenen miktarlarda homojen şekilde eklenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, ASTM C109 standardına göre referans harc numuneleri hazırlanmıştır. Sonraki aşamada ise, harc kompozisyonunda bulunan Standart kum, sırasıyla %10,%20,%30,%40 oranlarında atık döküm kumu ile ağırlıkça yer değiştirilerek ADK içeren harc numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan küp numune örnekleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Deney için hazırlanan küp numune örnekleri.

Figure 4. Prepared cubic mortar samples.

2.3 Sızma testi

Hazırlanan harc numunelerinin, farklı çevresel koşullardaki davranışlarının incelenmesi amacıyla farklı pH ve kür koşullarında (pH=4; saf su; MgSO₄) bekletilerek ağır metal

salınımları incelenmiştir. Asidik ortamı sağlamak için derişik hidroklorik asit (HCl) kullanılmıştır.

Hazırlanan harç numuneleri, hacimce Su: Katı oranı 10:1 (V/V) olacak şekilde 1250 ml çözelti içerisinde konulmuştur. Üç farklı çözelti içerisinde bekletilen numuneler, iki tekrarlı olarak ICP-OES cihazında 0, 1, 7, 28, 56 ve 90. günlerde 10 ml örnek alınarak ağır metal analizleri gerçekleştirilmiştir. Deney seti Şekil 5' te gösterilmiştir.



Şekil 5. Sızma testi için hazırlanan kürler.

Figure 5. Different curing environments for leaching test.

3 Sonuçlar ve yorumlar

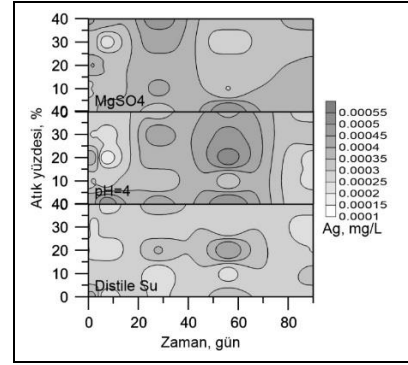
Çevresel boyutların incelenmesi amacıyla atık karakterizasyonu yapılmış ve hazırlanan harç numunelerinin 0, 1, 7, 28, 56 ve 90. gün olmak üzere farklı koşullarda ağır metal salınımları test edilmiş ve sonuçları grafikler halinde verilmiştir. Ayrıca, çeşme suyu ortamında kürlenmiş numunelerin 7, 28 ve 90. günlerde, farklı kür ortamında kürlenmiş numunelerin ise 90. Günde basınç dayanımı test edilmiş ve sonuçları ilgili başlıkta paylaşılmıştır.

3.1 Çevresel salınım testi sonuçları

Farklı günlerde ve farklı kür ortamlarında bekletilen harç numunelerinin yapmış olduğu ağır metal salınım miktarlarını belirlemek üzere ICP-OES ile eluat analizleri yapılmıştır. Analizlerde her bir ağır metal parametresi için bekleme süresi ve su ortamı özelliklerine bağlı ağır metal derişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafiksel gösterimlerde 0, 7, 14, 28, 56, 90. Günlere ait farklı ADK kullanım oranlarına bağlı eluat değerleri gözlemlenmektedir. Bazı parametrelerin analiz süreçlerinde ICP-OES cihazında yaşanan bazı problemlerden ötürü 56. ve 90. Günlere ait analizler yapılamadığı için bu parametrelerin grafikleri 0, 7, 14, 28. günleri kapsamaktadır. Farklı kür ortamlarında bulunan numunelerin çeşitli ağır metallere dair salınım testi sonuçları grafikler halinde, Şekil 6'dan Şekil 18'e kadar gösterilmiştir.

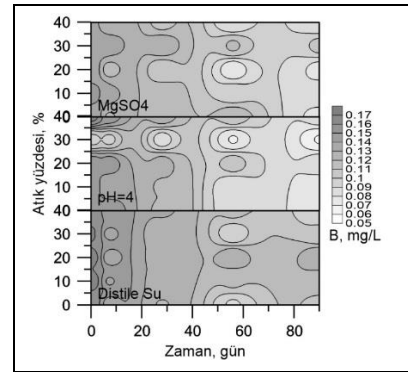
Harç numunelerinin gümüş (Ag) salınımları incelendiğinde, saf suya göre asidik ortam ve sülfat yoğun ortamda gümüş derişimlerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Saf su ve asidik ortamda 56. Gün ve %20 atık oranında daha yüksek derişimler gözlemlense de 90. Günde derişim değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Bor (B), açısından tüm kür ortamlarında derişimini zamanda bağlı olarak azalma gösterdiği belirlenmiştir. Bu da kür ortamlarındaki başlangıçtaki bor derişiminin beton küpler tarafından adsorbe edilerek miktarının azaldığını göstermektedir.



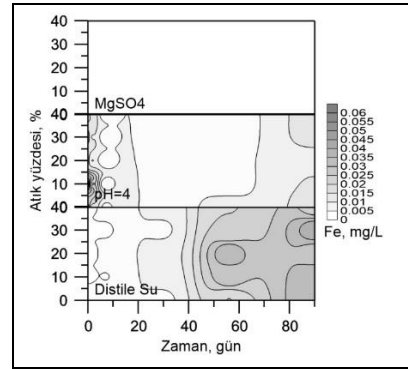
Şekil 6. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Gümüş (Ag) salınım test sonuçları.

Figure 6. Silver (Ag) leaching test results of samples in different curing conditions.



Şekil 7. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Bor (B) salınım test sonuçları.

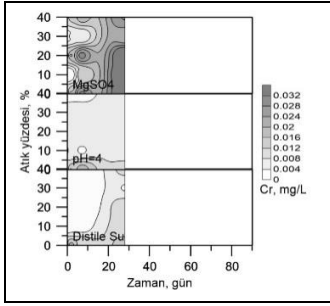
Figure 7. Boron (B) leaching test results of samples in different curing conditions.



Şekil 8. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Demir (Fe) salınım test sonuçları.

Figure 8. Iron (Fe) leaching test results of samples in different curing conditions.

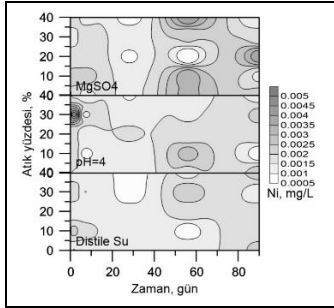
Demir (Fe), parametresi açısından distile su ortamında zamana bağlı bir miktar derişimde artış gözlemlense de, asidik ortam ve sülfat ortamlarında derişimde önemli bir derişim yaşanmadığı görülmektedir.



Şekil 9. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Krom (Cr) salınım test sonuçları.

Figure 9. Chromium (Cr) leaching test results of samples in different curing conditions.

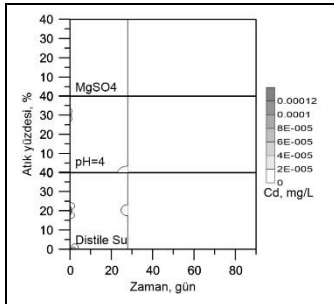
Krom (Cr) sonuçları incelendiğinde, distile su ve asidik kür ortamlarında önemli bir derişim farkı yaşanmaz iken, sülfat ortamında Cr derişiminin zaman bağı olarak arttığı görülmektedir. Fakat artan bu derişim referans harç numunesinde de gözlemlenmektedir. Bu durum, oluşan salınımın ADK haricinde harç numunesinin üretiminde kullanılan diğer bileşenlerden kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 10. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Nikel (Ni) salınım test sonuçları.

Figure 10. Nickel (Ni) leaching test results of samples in different curing conditions.

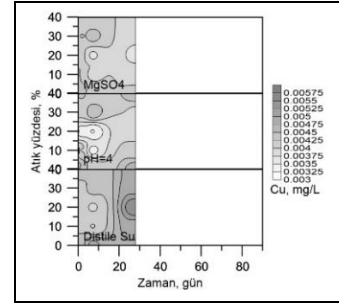
Nikel (Ni) salınım miktarlarının günlere ve ADK kullanım oranına bağı çok büyük değişim göstermediği, yine de sülfat yoğun kür ortamında bir miktar salınım gösterdiği görülmektedir.



Şekil 11. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Kadmiyum (Cd) salınım test sonuçları.

Figure 11. Cadmium (Cd) leaching test results of samples in different curing conditions.

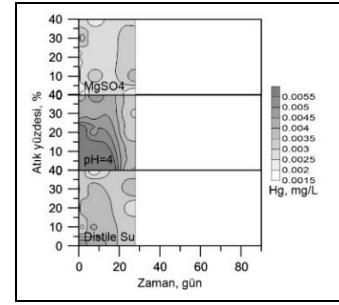
Kadmiyum (Cd) miktarlarının kür ortamı, kullanılan ADK miktarı ve deney süresi boyunca değişiklik göstermediği görülmektedir.



Şekil 12. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Bakır (Cu) salınım test sonuçları.

Figure 12. Copper (Cu) leaching test results of samples in different curing conditions

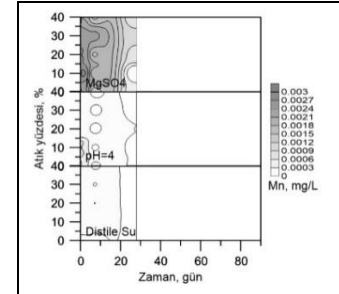
Bakır (Cu) analiz sonuçları incelendiğinde saf su ortamında %20 ADK oranında 28. Günde salınım miktarının arttığı görülmektedir. Fakat bu durum daha reaktif koşullar olan asidik ve sülfat yoğun kür ortamlarında gözlemlenmemiştir. Gerçekleşen artışın çok yüksek oranlarda olmaması ve diğer agresif kür ortamlarında gözlemlenmemesi Cu parametresinin salınım miktarının önemli düzeylerde olmadığını göstermektedir.



Şekil 13. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Civa (Hg) salınım test sonuçları.

Figure 13. Mercury (Hg) leaching test results of samples in different curing conditions.

Civa (Hg) salınım değerlerinde her 3 ortamda süreye bağı Hg derişiminin azaldığı görülmektedir. Bu kapsamda harç numuneleri tarafından Hg nin adsorbe edilmesi veya uçucu hale gelerek ortamdaki uzaklaşması nedeniyle derişimin zamana bağı azaldığı görülmektedir.

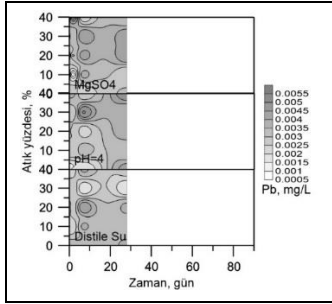


Şekil 14. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Mangane (Mn) salınım test sonuçları.

Figure 14. Manganese (Mn) leaching test results of samples in different curing conditions.

Mangane (Mn) değerlerinin saf su ve asidik kür ortamında önemli bir değişikliğe neden olmadığı görüldüğü de sülfat ortamında başlangıçtaki derişim değerlerinin daha fazla olduğu

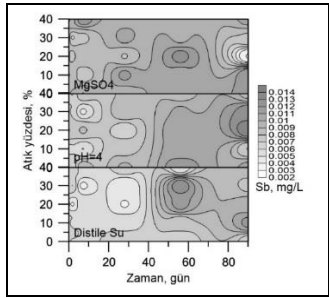
görülmektedir. Kür ortamı için kullanılan $MgSO_4$ kimyasalında Mn kirliliğe bağlı daha yüksek derişimlerin gözlemlendiği belirlenmiştir. Bu miktar süreye bağlı olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 15. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Kurşun (Pb) salınım test sonuçları.

Figure 15. Lead (Pb) leaching test results of samples in different curing conditions.

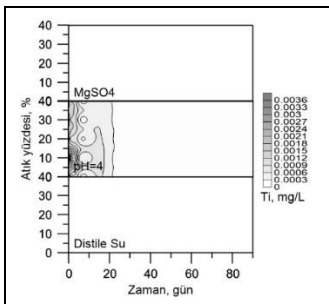
Kurşun (Pb) değerleri incelendiğinde asidik ve sülfat yoğun kür ortamlarında %20 ve %30 ADK kullanılan harç numunelerinin salınım değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat 28. gün sonundaki derişim miktarının salınımına rağmen çok yüksek düzeylerde olmadığı görülmektedir.



Şekil 16. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Antimon (Sb) salınım test sonuçları.

Figure 16. Antimony (Sb) leaching test results of samples in different curing conditions.

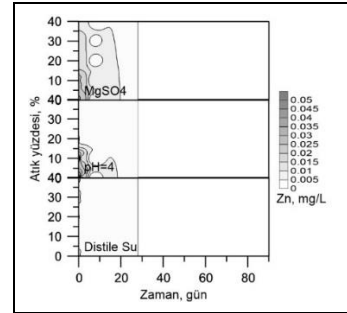
Antimon (Sb) salınım miktarları incelendiğinde her 3 kür ortamında da 56 ve 90. gün sonrası derişimlerde artış gözlemlenmektedir. Fakat bu salınım miktarlarının ADK yüzde artışlarıyla orantılı olmadığı ve nihai derişimlerin yüksek olmadığı görülmektedir.



Şekil 17. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Titanyum (Ti) salınım test sonuçları.

Figure 17. Titanium (Ti) leaching test results of samples in different curing conditions.

Titanyum (Ti) derişimlerinin asidik koşulda başlangıçta yüksek olduğu fakat sonrasında azaldığı ve diğer tüm kür ortamlarında düşük derişimlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 18. Farklı kürlerde bulunan numunelere ait Çinko (Zn) salınım test sonuçları.

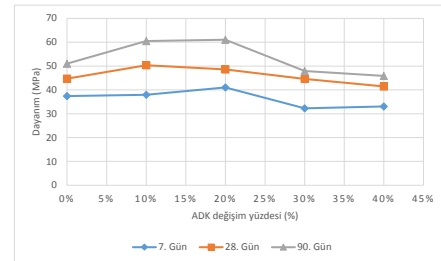
Figure 18. Zinc (Zn) leaching test results of samples in different curing conditions.

Çinko (Zn) parametreleri incelendiğinde asidik ve yüksek sülfat içerikli kür ortamlarında referans ve %10 ADK içerikli harç numunelerinde başlangıç derişimleri yüksek iken sonraki günlerde derişimlerin düştüğü görülmektedir. Tüm kür ortamlarında nihai derişimlerin oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Ağır metal salınımları genel olarak incelendiğinde harç numuneleri içerisindeki atık döküm kumundan gelen ağır metal derişimlerinin salınım göstermediği, hatta gümüş, magnezyum, nikel, antimon, titanyum gibi ağır metal derişimlerinin adsorpsiyona bağlı azalma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Nikel parametresinde 90. Günde yapılan analizlere göre suya belirli miktarda salınım olduğu gözlemlenmiştir. Fakat bu değer 0.08 mg/kg olup evsel atıkların depolandığı II. Sınıf depolama tesisi değeri olan 1 mg/kg derişiminin altında kalması nedeniyle bu salınım miktarın çevresel açıdan büyük bir risk taşımayacağı öngörülebilir.

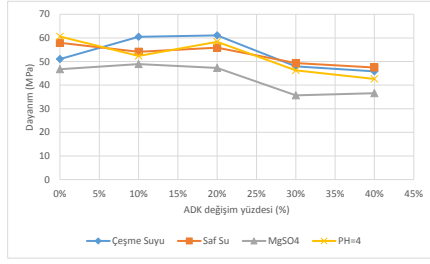
3.2 Basınç dayanım testi sonuçları

ASTM C109 standardına göre hazırlanan ve priz süresi tamamlanan numuneler 20°C'de, çeşme suyu ile doldurulmuş olan kür havuzunda bekletilmiş ve 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. Ayrıca, bir grup numune de farklı kür ortamlarında 90 gün boyunca kürlenmiş ve 90. Gün basınç dayanımları test edilmiştir. Referans numuneleri ve ADK içerikli harç numunelerinin basınç dayanımı test sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir. Verilerin grafiğe dökülmüş halleri ise Şekil 19' ve Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 19. Çeşme suyu ortamında kürlenen numunelerin basınç dayanımı test sonuçları.

Figure 19. Compressive strength values of the samples cured in tap water.



Şekil 20. Farklı kür ortamlarında bulunan numunelerin 90. Gün basınç dayanımı test sonuçları.

Figure 20. 90th day Compressive strength values of the samples cured in different conditions.

Tablo 4. Basınç dayanımı testi sonuçları.

Table 4. 90th compressive strength test results.

Gün Sayısı	Numune Adı	Ağırlık (g)	Dayanım (MPa)
7.Gün Çeşme Suyu	Referans	284.3	37.41
	10%	284.7	37.95
	20%	284.7	41.06
	30%	282.3	32.29
	40%	280.6	33.08
28.Gün Çeşme Suyu	Referans	283.3	44.73
	10%	285.3	50.36
	20%	287.0	48.57
	30%	283.8	44.61
	40%	283.5	41.46
90.Gün Çeşme Suyu	Referans	282.4	51.00
	10%	286.1	60.48
	20%	286.1	61.06
	30%	281.1	47.93
	40%	281.3	45.85
90.Gün Saf Su	Referans	284.4	57.91
	10%	288.4	54.10
	20%	290.5	55.87
	30%	284.2	49.35
	40%	283.4	47.44
90.Gün MgSO4	Referans	282.2	46.74
	10%	292.0	48.94
	20%	291.4	47.28
	30%	286.3	35.69
	40%	283.7	36.57
90.Gün pH=4	Referans	288.5	60.60
	10%	289.0	52.37
	20%	289.2	58.33
	30%	283.3	46.25
	40%	284.9	42.65

Sonuçlar incelendiğinde çeşme suyu kür ortamında bekletilen harç numuneleri için, %10 ve %20 oranında ADK içeren harç numunelerinin 7. gün ve 28. gün ve 90. gün basınç dayanım değerlerinin, referans harç numunesine ait basınç dayanım değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bilhassa 90. günde basınç dayanım değerindeki artış yaklaşık olarak %19.6 değerine ulaşmaktadır. %30 ve %40 oranında ADK içeren numunelerde ise tüm yaşlar için basınç dayanım değerlerinde kısmi olarak azalma gözlemlenmiş fakat, dayanımdaki düşüş maksimum %12 değerinde olmuştur.

Farklı kür ortamlarında bulunan numunelerin sonuçları incelendiğinde, harç numunelerinin, ADK kullanımından bağımsız olarak farklı kür ortamlarında farklı performans gösterdiği görülmüştür. Değişen kür ortamına bağlı olarak, basınç dayanım değerlerinin olumlu ya da olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmiştir. Farklı kür ortamlarına bağlı sonuçlar aşağıda detaylı olarak ifade edilmiştir.

Saf su kür ortamı 90. gün dayanım değerleri incelendiğinde, referans numunesi dahil her bir numune için basınç dayanımı değeri çeşme suyu kür ortamına göre daha düşüktür. Bununla birlikte artan ADK oranına bağlı olarak da dayanım değerlerinde, saf suda kürlenmiş referans numunesine göre maksimum %18.5 oranında düşüş gözlemlenmiştir.

MgSO₄ kür ortamı 90. gün dayanım değerleri incelendiğinde referans numunesi dahil her bir numune için basınç dayanımı değeri çeşme suyu kür ortamına göre daha düşüktür. Tüm numuneler için en belirgin dayanım düşüşü MgSO₄ kür ortamında gözlemlenmiştir. Artan ADK oranına bağlı olarak gözlenen dayanım düşüşü ise yaklaşık olarak %21 değerinde olmuştur. Çeşme suyu kür ortamına göre tüm dayanım değerlerinde belirgin bir düşüş olması, çimento harcının MgSO₄ kür ortamına dayanıklılığının düşük seviyede olduğunu göstermektedir.

MgSO₄ kür ortamı 90. gün dayanım değerleri incelendiğinde referans numunesi dahil her bir numune için basınç dayanımı değeri çeşme suyu kür ortamına göre daha düşüktür. Tüm numuneler için en belirgin dayanım düşüşü MgSO₄ kür ortamında gözlemlenmiştir. Artan ADK oranına bağlı olarak gözlenen dayanım düşüşü ise yaklaşık olarak %21 değerinde olmuştur. Çeşme suyu kür ortamına göre tüm dayanım değerlerinde belirgin bir düşüş olması, çimento harcının MgSO₄ kür ortamına dayanıklılığının düşük seviyede olduğunu göstermektedir.

Farklı kür ortamlarından bağımsız olarak, ADK kullanımının %10-%20 oranında kullanımının genel olarak dayanıma olumlu yönde katkı yaptığı sonucu elde edilmiştir. Bu durumun, ADK kumunun kendi mekanik özelliklerine bağlı olduğu düşünülmüştür. %30-%40 oranlarında ADK kullanımı ise dayanımı olumsuz etkilemiştir. Fakat, dayanım düşüş değeri maksimum %12 olmuştur. Dayanım değerleri ile birlikte çevresel salınım testi sonuçları da dikkate alındığında, ADK'nın %20 oranında kullanımının uygun olduğu kanısına varılmıştır.

3.3 Yorumlar ve öneriler

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin ağır metal salınımları genel olarak incelendiğinde harç numuneleri içerisindeki atık döküm kumundan gelen ağır metal derişimlerinin salınım göstermediği, hatta gümüş, magnezyum, nikel, antimon, titanyum gibi ağır metal derişimlerinin adsorpsiyona bağlı azalma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak, ADK'nın çevresel açıdan olumsuz bir etkiye sebep olmaksızın harç üretiminde kullanılabilirliği öngörülmüştür.

ADK'nın çevresel etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, sadece ADK'nın bünyesindeki ağır metallerin salınımlarının incelenmiş olup, çeşitli organik bağlayıcı bileşikler, reçinelerden kaynaklanan VOC ve PAH gibi kirleticilerin etkilerinin de değerlendirilmesi de ayrı bir araştırma konusudur [10].

Yapılan çevresel değerlendirmenin haricinde harç içerisinde kullanılan atık döküm kumunun basınç dayanımı üzerine olan etkileri değerlendirildiğinde, eklenen atık döküm kumunun

%10,20 oranında ince kum ile ikame edilmesi durumunda basınç dayanım değerlerinde pozitif yönde bir etki yarattığı belirlenmiştir. %30-40 oranında ADK ikamesi durumunda ise basınç dayanımı değerlerinde bir düşüş olduğu, fakat bu düşüşün kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın çevresel boyutu ve inşaat sektöründe teknik açıdan kullanılabilirliğinin yanı sıra, gerçekleştirilen geri dönüşümün ekonomiye olan katkılarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Daha önce tehlikesiz atık olduğu belirlenen Maça kumunu atık olarak kabul eden firma olmadığı için, bir atık bertaraf tesisine "10 10 07- Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları" atık kodu ile tehlikeli atık olarak gönderilmektedir. Ülkemizde tehlikeli atıkların bertarafı için lisanslı bertaraf firmaları görev yapmaktadır. Bu kapsamda, tehlikeli atık üreten kurum ve kuruluşlar bu firmalara başvurarak tehlikeli atıkların bertarafını, atığın enerji içeriği, tehlike düzeyi ve birim miktarına göre fiyat belirlemesi yaparak ücret karşılığı sağlamaktadır. Firmadan alınan verilere göre ADK'nın 2017 yılı bertaraf ücreti ton başına 50 USD dir. Yıllık bertaraf edilen atık miktarı yaklaşık olarak 698 tondur ve maliyet olarak bakıldığında sadece atık bertarafı için 35 750 USD harcanmaktadır. Türkiye'de döküm proseslerinden yaklaşık 292.500 ton atık kum oluşmaktadır. Ekonomik açıdan, yapılan çalışmanın uygulamaya geçmesi halinde Türkiye'de uygulanacak çalışmanın 15 050 000 USD kazanç getireceği öngörülmektedir. Ayrıca bir sektörün atığı diğer sektörün hammaddesi olacağından endüstriyel simbiyoz sağlanacaktır.

4 Conclusions

When the heavy metal leaching behavior of the samples produced within the scope of the study was examined, it was observed that the heavy metal concentrations from the waste casting sand in the mortar samples did not leach, and even the heavy metal concentrations such as silver, magnesium, nickel, antimony, titanium showed a decrease due to adsorption. Accordingly, it was concluded that WCS can be used in the production of mortar without causing an adverse environmental impact.

In this study, in which environmental effects of ADC were investigated, only the leaching of heavy metals within the body of WCS were examined. The assessment of the effects of pollutants such as VOC and PAH caused by various organic binder compounds and resins can also be considered as a different research topic [10].

In addition to the environmental assessment made within the scope of the study, the effects of the waste casting sand on the compressive strength of the mortar were also examined. When the results are evaluated, it has been observed that if the added waste casting sand is replaced with fine sand at the rate of 10-20%, it has a positive effect on compressive strength values. In the case of 30-40% WCS replacement, it was determined that there was a decrease in compressive strength values, but this decrease was within acceptable limits.

Along with the environmental aspect of the study and its technical usability in the construction sector, the contribution of the recycling to the economy should also be taken into account. Since there is no company that accepts core sand as waste, which was previously determined to be non-hazardous waste, it is currently sent to a waste disposal facility as hazardous waste with the waste code "10 10 07- Casting cores

and molds which have undergone pouring, containing hazardous substances". Today, in our country, licensed disposal companies work for the disposal of hazardous wastes. In this context, institutions and organizations that produce hazardous waste apply to these companies and provide the disposal of hazardous wastes for a fee by determining the price according to the energy content, hazard level and unit amount of the waste. According to the data obtained from such a company, the 2017 disposal fee of WCS is 50 USD per ton. The amount of waste disposed annually is approximately 698 tons and from a cost perspective 35 750 USD is spent only for waste disposal. In Turkey, approximately 292 500 tonnes of waste sand from the casting process is emerging. From an economic point of view, it is predicted that if the work is put into practice, 15 050 000 USD of savings will be achieved. In addition, industrial symbiosis will be achieved as the waste of one sector will be the raw material of the other sector.

5 Kaynaklar

- [1] Başar HM. Dökümhanelerden Kaynaklanan Atıkların Uygun Geri Kazanım/Tekrar Kullanım ve Bertaraf Yöntemlerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [2] Başar HM, and Aksoy DA. "Recovery Applications of Waste Foundry Sand". *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 30, 205-224, 2012.
- [3] Kosmol L. "Sharing is caring-information and knowledge in industrial symbiosis: a systematic review". *IEEE 2019 21st Conference on Business Informatics (CBI)*, Moscow, Russia, 15-17 July 2019.
- [4] Sylvia JG. *Cast Metals Technology*. Lakeville, USA, Addison-Wesley, 1972.
- [5] Akakin T, Kılınc C, Işık A, Zengin H. "Hazır beton sektörü ve beton kullanımındaki gelişmeler". *Hazır Beton*, 2, 66-72, 2013.
- [6] EPA. "Profile of the Metal Casting Industry". EPA Office of Compliance Sector Notebook Project, EPA/310-R-97-004, Washington DC, USA, 1997.
- [7] Zanetti CM, Fiore S. "Foundry processes: the recovery of green moulding sands for core operations". *Resources, Conservation and Recycling*, 38, 243-254, 2002.
- [8] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Türkiye'de Sanayiden Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetiminin İyileştirilmesi Döküm Sektörü Rehber Doküman". Ankara, Türkiye, 2012.
- [9] European Commission. "Commission Notice on Technical Guidance on the Classification of Waste". EU, 2018/C 124/01, 2018.
- [10] Carlsson R. and Nayström P. "Waste sand re-use from swedish metal casting". *Procedia Environmental Sciences*, 35, 624-628, 2016.
- [11] Kocasoy G, Aydın GA, Zeren BA. *Gelişmekte Olan Ülkelerde Tehlikeli Atıkların ve Deprem Atıklarının Yönetimi*. İstanbul, Türkiye, Boğaziçi Üniversitesi, 2005.
- [12] Çevre ve Orman Bakanlığı. "ÇED Rehberi, Atık Bertaraf Tesisleri". Ankara, Türkiye, 2006.
- [13] European Communities. "Council Directive of 15 July 1975 on Waste". 75/442/EEC, 1975.
- [14] Çevre ve Orman Bakanlığı. "Tehlikeli Atıkların Sınıflandırılması Kılavuzu". HAWAMAN Projesi, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2009.

- [15] Nithya M, Priya AK, Muthukumaran R, Arunvivek GK. "Properties of concrete containing waste foundry sand for partial replacement of fine aggregate in concrete". *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 24(2), 162-166, 2017.
- [16] Sastry KVSGK, Reddy TCS, Ravitheja A. "Effect of foundry sand and mineral admixtures on mechanical properties of concrete". *Archives of Civil Engineering*, 64(1), 117-131, 2018.
- [17] Siddique R, Singh G, Belarbi R, Ait-Mokhtar K, Kunal. "Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete". *Construction and Building Materials*, 83, 216-222, 2015
- [18] Siddique R, Schutter G, Noumowe A. "Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete" *Construction and Building Materials*, 23(9), 76-80, 2009.
- [19] Etxeberria M, Pacheco C, Meneses JM, Beerridi I. "Properties of concrete using metallurgical industrial by-product as aggregate". *Construction and Building Materials*, 24, 1594-1600, 2010.
- [20] Singh G, Siddique R. "Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete". *Construction and Building Materials*, 26, 416-422, 2012.
- [21] Guney Y, Sari YD, Yalcin M, Tuncan A, Donmez S. "Re-Usage of waste foundry sand in high strength concrete". *Waste Management*, 30, 1705-1713, 2010.
- [22] Environmental Protection Agency. "EPA 3051-A Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, And Oils". USA, EPA 3051-A, 2007.
- [23] Environmental Protection Agency. "EPA 200.7-Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry". USA, EPA 200.7, 2019.
- [24] Türk Standartları Enstitüsü. "TS EN 12457-4-Characterisation of Waste - Leaching - Compliance Test for Leaching of Granular Waste Materials and Sludges - Part 4: One Stage Batch Test at a Liquid to Solid Ratio of 10 l/kg for Materials with Particle Size Below 10 mm (without or with Size Reduction)". Ankara, Türkiye, TS EN 12457-4, 2004.
- [25] Türk Standartları Enstitüsü. "TS EN 196-1-Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini". Ankara, Türkiye, TS EN 196-1, 2016.
- [26] American Society for Testing and Materials. "ASTM C109-Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)". ASTM C109, PA, USA, 2020.