

# مطالعه و بررسی برخی از پارامترهای اثرگذار محیطی بر آزادسازی کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی در محیط‌های آبی

هومن بهمن‌پور\*<sup>۱</sup>، مژگان زعیمدار<sup>۲</sup> و مرضیه رحیمی<sup>۳</sup>

۱. گروه محیط زیست، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود

۲. گروه محیط زیست، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

۳. گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۱

## چکیده

پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی انواعی از پسماندهای ویژه می‌باشند که قطعات اصلی آن‌ها شامل خازن، ترانزیستور، آی.سی، مدارات الکترونیکی، قطعات کاتدی و آندی بوده و دارای خاصیت سمیت، بیماری‌زایی و پایایی در محیط پیرامون و حتی در پیکره جانداران، خوردگی تاسیسات و تجهیزات و مشابه آن می‌باشند. بر این اساس، هدف از این تحقیق بررسی و شناسایی عوامل موثر در آزادسازی این فلزات و اختصاصاً عنصر کادمیوم در محیط پیرامون می‌باشد. جهت بررسی این موضوع تاثیر عوامل مختلف مانند دما، pH، ترکیبات هامیک و زمان بر روی آزادسازی عنصر کادمیوم از اینگونه پسماندها به محیط‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور قطعات انتخابی آنالیز گردیده و مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بیانگر آن بوده است که در محیط آبی، میزان نفوذ کادمیوم در pH بسیار اسیدی و بسیار قلیایی میزان آزادسازی افزایش می‌یابد. همچنین؛ در محیط آبی، افزایش دما سبب افزایش میزان نفوذ عنصر کادمیوم در محیط می‌گردد و اثر پارامتر زمان تماس نیز متناسب با تغییرات pH متغیر می‌باشد.

واژگان کلیدی: پسماند الکترونیکی، کادمیوم، pH، محیط آبی

## مقدمه

از عناصر خطرناک و در کنار آن دارای چه عناصری ارزشمند مانند طلا و نقره است که بازیافت اصولی آنها می‌تواند علاوه بر صرفه اقتصادی، جلوی خطرات زیست‌محیطی را نیز بگیرد. بنابراین، دفن یا سوزاندن زباله‌ها سبب ورود عناصر سنگین و گازهای سمی به محیط‌زیست و آب‌های زیرزمینی می‌شود (نجفی، ۱۳۹۰؛ اسدی و همکاران، ۱۳۷۷).

فلزات سنگین از عناصر سازنده پوسته زمین هستند و دچار تخریب و یا فرسایش نمی‌شوند. این فلزات که از جمله آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌باشند، در اندازه بسیار کم، از طریق غذا، آب آشامیدنی و یا هوا وارد بدن ما می‌شوند و می‌توانند مسمومیت‌های مزمن و بعضاً حاد خطرناکی را ایجاد نماید (Manc, 1987). سرب موجود در CRT رایانه‌ها یا لامپ اشعه کاتدی، وسیله نمایش تصویر در مانیتور است که نه تنها می‌تواند آب‌های سطحی را آلوده کند، بلکه به راحتی به سفره‌های آب‌های زیرزمینی که تأمین‌کننده منابع آبی بسیاری از شهرهای بزرگ است راه پیدا می‌کند. سرب بر بیشتر دستگاه‌های بدن انسان و پستانداران و پرندگان از جمله دستگاه عصبی، سیستم گردش خون، دستگاه‌های تناسلی اثر سوء دارد. این در حالی است که اکثر لحیم‌کاری‌های مدارهای رایانه و بیشتر قطعات موجود در مانیتور رایانه دارای سرب است. بین سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۴، نزدیک به ۶۰۰ میلیون کیلوگرم سرب ناشی از زباله‌های رایانه‌ای مربوط به ۳۱۵ میلیون رایانه از رده خارج شده در امریکا وارد محیط شده است (نجفی، ۱۳۹۰).

رشد سریع آلودگی‌های الکترونیکی و ورود سریع و بی‌رویه آن‌ها به محیط‌زیست، امروزه به صورت یک بحران درآمده است. این بحران اگرچه تاکنون بیشتر متوجه کشورهای صنعتی و پیشرفته دنیا بوده است، اما باید به این نکته هم توجه کرد که موج بحران در کشورهای صنعتی، قاعدتاً با چند سال تأخیر به کشورهای در حال توسعه هم خواهد رسید (احمدی، ۱۳۸۷).

مدیریت دفع این مواد به دلیل دشواری جداسازی و ناکافی بودن تحقیقات در زمینه ی فرایند بازیافت آن‌ها با چالش مواجه است. به عنوان نمونه، خطرات فلزات سنگین بر روی انسان آسیب به اندام‌های حساس نظیر کلیه و کبد می‌باشد و پلاستیک‌ها در صورت زباله‌سوزی تولید گروه گازهای دی‌اکسین و فوران می‌نمایند، که سرطان‌زایی آن‌ها قطعی است. انتخاب شیوه‌های جمع‌آوری، جداسازی، پردازش،

پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی انواعی از پسماندهای ویژه است که دارای خاصیت سمیت، بیماری‌زایی و پایایی در محیط پیرامون و حتی در پیکره جانداران، خوردگی و مشابه آن می‌باشند و در اصل، به پسماندهای ویژه‌ای گفته می‌شود که غالب قطعات اصلی آن‌ها شامل خازن، ترانزیستور، آی سی، مدارات الکترونیکی، قطعات کاتدی و آندی و از این قبیل می‌باشد (نجفی، ۱۳۹۰). بطور کلی این پسماندها به دو دسته الکتریکی مانند باتری، یخچال، ماشین لباسشویی، اتو، لامپ، ... و الکترونیکی مثل کلیه قطعات رایانه‌ای، دستگاه‌های رادیویی و تلویزیون، انواع پخش‌کننده‌های صوتی و تصویری، ... تقسیم می‌شوند.

این نوع پسماند مشکلی است که به تازگی در حال پدیدار شدن می‌باشد و همچنین به عنوان یک فرصت شغلی که دارای اهمیت روزافزون است نیز تلقی می‌شود. حجم زیادی از پسماندهای الکترونیکی تولید شده در جهان می‌تواند حاوی مواد سمی و همچنین مواد باارزش باشد. از تجزیه این مواد، آهن، مس، آلومینیوم، طلا و دیگر مواد به دست می‌آید که متجاوز از ۶۰ درصد می‌باشد.

آمریکا بزرگ‌ترین تولیدکننده پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی در جهان می‌باشد. در خاورمیانه، سریع‌ترین بازار مصرف پسماندهای الکترونیکی نیز مربوط به ایران می‌باشد. سرانه تولید این زباله‌ها در دنیا از ۲۰۰ گرم تا ۱۴ کیلوگرم متغیر است. در این نوع از پسماندها، عناصری از قبیل سرب، استرانسیوم، جیوه، کادمیوم، نیکل، آرسنیک، مس، روی، باریم، برلیوم، انواع پلاستیک‌ها، آلومینیوم، طلا، نقره، پلاتین، مواد شیمیایی خطرناک حاصل از مواد مصرفی، دی فنیل اترهای پلی برومینه *Diphenyl ethers of poly Burma* (PBDEs)، و به صورت نادر آلوده‌کننده‌های آلی پایدار (POPs) یا ترکیبات هالوژن‌دار مخرب لایه ازن از قبیل پلی‌کلرو بی‌فنیل‌ها (PCBs) یافت می‌شوند که اثرات زیان‌آوری روی محیط زیست و سلامتی انسان می‌گذارند (Lide et al., 2000 موسوی و همکاران، ۱۳۹۲).

هر رایانه رومیزی دارای ۳۲ درصد پلاستیک، نزدیک به ۷ درصد سرب، ۴۱ درصد آلومینیوم، مقادیری طلا، نقره و آهن و نیز مقادیری فلزات سنگین و خطرناک مانند کادمیوم، جیوه و آرسنیک است. بنابراین، می‌توان به طور تقریبی محاسبه کرد که ۴ میلیون رایانه از دور خارج شده، حاوی چه حجم عظیمی

بازیافت و دفع مناسب و مبتنی بر اصول قابل پذیرش علمی کمک شایانی در کنترل و مداخله مؤثر در چرخه گردش مواد زائد و جهت‌دهی آن به سمت بهره‌گیری دوباره همزمان با کاهش مخاطرات زیست‌محیطی می‌گردد.

«کنوانسیون بازل» زباله‌های الکترونیکی را به‌عنوان زباله‌های خطرناک می‌شناسند. امروزه به‌موازات شناخت اثرات سوء و مخرب ناشی از مواد شیمیایی خطرناک، راهبردهایی در جهت کنترل صحیح آن‌ها در نظر گرفته شده است و تنها با تحقق بخشیدن به این راهبردهای پیشگیری‌کننده است که می‌توان کشورها را از تکرار اشتباهات مکرر بر حذر داشت (آموزشی و همکاران، ۱۳۸۷).

کادمیوم برای گیاهان، جانوران و انسان بسیار سمی می‌باشد و عملکرد بیوشیمیایی یا تغذیه‌ای آن شناخته نشده است. همانند سرب، کادمیوم در طی زمان می‌تواند جذب بدن شود که در صورت جذب طولانی‌مدت منجر به تخریب کلیه‌ها و ساختار استخوان‌ها خواهد شد. در افراد و حیوانات جذب

کادمیوم از طریق رژیم غذایی عمدتاً منجر به آسیب کلیه‌ها خواهد شد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که آسیب‌دیدگی کلیه‌ها در غلظت‌های پائین‌تر کادمیوم نسبت به آنچه قبلاً پیش‌بینی شده بود اتفاق می‌افتد. دیگر اثرات کادمیوم شامل بر هم خوردن ساختار کلسیم و عملکرد آن در بدن و اثرات آن بر استخوان و همچنین افزایش فشارخون و ناراحتی‌های قلبی می‌باشد. استنشاق اکسید کادمیوم از طریق گردوغبار بر سیستم تنفسی تأثیر خواهد گذاشت. علاوه بر این، کادمیوم و ترکیبات آن برای انسان سرطان‌زا شناخته شده‌اند که اولین اثرات آن به‌صورت سرطان ریه در اثر استنشاق گردوغبار آلوده به کادمیوم دیده شده است. کادمیوم در صورتی که در محیط آبی رها شود بیشتر از سایر فلزات در محیط حرکت می‌کند (موسوی و همکاران، ۱۳۹۲).

در این راستا محققان و دانشمندان زیادی به تحقیق در این زمینه پرداختند. در جدول (۱) به برخی از آنها اشاره شده است.

جدول ۱- خلاصه تحقیقات مرتبط در زمینه اثرات زیست محیطی پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی

ردیف	محققان	سال	موضوع بررسی	نتایج
۱	Nnorom و همکاران	۲۰۱۰	بررسی انتشار فلزات سنگین از دفع پسماند مانیتورهای کامپیوترها در یک انبار روباز.	انتشار فلزات سنگین به ویژه سرب از مانیتورهای شکسته در نقاط دفع پسماند الکترونیکی نشان داده شد. غلظت زیادی از سرب، ۱۲-۱/۳ درصد کل سرب، با الکترولیت‌های ضعیف شسته شد.
۲	Guo و همکاران	۲۰۰۹	تأثیر بازیافت زباله‌های الکترونیکی در گوئیو، واقع در جنوب شرق چین، بر آلودگی سیستم آبی اطراف به فلزات سنگین بررسی کردند. غلظت‌های As, Cu, Pb, Ni, Cd, Hg را در نمونه‌های جمع‌آوری شده از رودخانه لیانژیانگ بررسی کردند.	غلظت فلزات سنگین در فصل بارندگی زیاد و در فصل خشک کم است. غلظت مس در آب‌های سطحی ناحیه ۲/۴ تا ۱۳۱ تا برابر غلظت مرجع بود و پس از مس به ترتیب Ni, Cd, Pb, Hg و As بیشترین غلظت را داشتند. با وجود این، در مقایسه با استاندارد زیست‌محیطی چین، ابتدا کادمیم و سپس Hg و Pb و مس به عنوان مضرترین عناصر شناخته شدند. غلظت مس در نمونه‌های رسوبی ۳/۲ تا ۴۲۹ برابر غلظت مرجع بود و پس از مس به ترتیب Ni, Cd, Pb, Hg و As بیشترین غلظت را داشتند.
۳	Huang و همکاران	۲۰۱۴	بررسی اثرات دفع پسماندهای الکتریکی بر محیط‌های آبی در آکرای غنا	مقدار فلزات سنگینی مانند سرب، کادمیم، مس و روی در نمونه‌های آبی بسیار زیاد است. همچنین، روش‌های قدیمی بازیافت پسماندهای الکترونیکی نیز منجر به آزادسازی این فلزات سنگین می‌شود. سرعت فلزات سنگین و آلاینده‌های آزاد شده از پسماندهای الکترونیکی که به رسوبات می‌چسبند و از این طریق وارد محیط‌های آبی می‌شوند به شدت به pH بستگی دارد.
۴	Zeine و همکاران	۲۰۱۵	بررسی اثرات زیست محیطی پسماندهای الکتریکی	نتایج نشان داد غلظت سرب، روی، کادمیم، نیکل و مس بیشتر از استاندارد مقدار مرجع فلزات سنگین است. همچنین مشخص شد که سرب فلز سنگین اصلی است که ابتدا باید از پسماندها جداسازی شود. نتایج تست استاندارد pH کنترل شده نشان داد تحرک فلزات سنگین در محدوده pH اسیدی بسیار بیشتر است.
۵	Michael و همکاران	۲۰۱۳	بررسی جداسازی فلزات سنگین از پسماندهای الکتریکی. نمونه آب‌های مختلف رودخانه‌های متفاوت را بررسی کردند و مقدار فلزات سنگین آزاد شده از پسماندهای الکتریکی را در آن‌ها اندازه گرفتند.	در این بررسی غلظت آرسنیک ۰/۰۵۳ ppm، کادمیم ۰/۰۱ ppm، سرب ۰/۰۴۲ ppm و جیوه ۰/۰۶۱ ppm بود. نتایج نشان داد اکثر فلزات تمایل به جداسازی دارند و میزان جداسازی آن‌ها به کیفیت آب بستگی دارد. در نتیجه جداسازی، پارامترهای فیزیکی-شیمیایی مانند pH، سختی و Total dissolved solids-TDS نمونه‌های آب تغییر کرد. این بررسی بر خطر دفع پسماندهای الکتریکی در بستر رودخانه به ویژه در زمان پایین بودن جریان آب و ساکن شدن جریان تأکید داشت.

## ادامه جدول ۱- خلاصه تحقیقات مرتبط در زمینه اثرات زیست محیطی پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی

۶	Song و همکاران	۲۰۱۴	تأثیرات محیطی فلزات سنگین آزاد شده از بازیافت پسماندهای الکترونیکی را در چین بررسی کردند.	چهار نوع فلز سنگین مس، سرب، کادمیم و کروم از پسماندهای الکترونیکی آزاد شدند. برای محافظت از محیط باید عملیات بازیافت پسماندهای الکترونیکی را که منجر به آزادسازی فلزات سنگین در محیط می‌شوند کنترل کرد.
۷	Bizzo و همکاران	۲۰۱۴	بازیافت فلزات سنگین از برد مدارهای چاپی کامپیوترهای دست دوم را بررسی کردند.	بردها دارای تقریباً ۲۶ درصد فلز بودند که اغلب آن‌ها مس، سرب، آلومینیوم، آهن، قلع، کادمیم و نیکل می‌باشند. مقایسه تطبیقی نشان داد غلظت فلزاتی مانند طلا و نقره به مرور زمان کاهش یافته است.
۸	Amfo-Otu و همکاران	۲۰۱۳	آلودگی خاک به فلزات سنگین آزاد شده از پسماندهای الکترونیکی را بررسی کردند. دو نمونه خاک را از ۶ سایت مختلف برای اندازه‌گیری لابرآتواری با ۱ سایت کنترل جمع‌آوری کردند. فلزات سنگین را با روش دایجست و با استفاده از طیف‌نورسنج جذب اتمی اندازه‌گیری کردند.	غلظت کادمیم، مس و جیوه در تمام سایت‌ها بیشتر از غلظت‌های به‌دست آمده برای سایت کنترل بود. بیشترین غلظت مس در ۶ سایت از نظر آماری تقریباً ۱۲۰۰ برابر مقدار به‌دست آمده در سایت کنترل بود. تفاوت چشمگیری در غلظت مس بین ۶ سایت وجود داشت. غلظت کادمیم ۵ برابر سایت کنترل بود. میانگین غلظت جیوه در سایت ۱۲ تقریباً ۳۴ برابر بیشتر از مقدار به‌دست آمده در سایت کنترل بود اما تفاوت قابل توجهی در غلظت جیوه بین شش سایت بازیافت پسماند و سایت کنترل مشاهده نشد. نتایج نشان داد بازیافت پسماندهای الکترونیکی منجر به آلودگی خاک به فلزات سنگین می‌شود
۹	Ofudje و همکاران	۲۰۱۳	بررسی مقدار سرب، کروم، نیکل، کادمیم و روی در خاک سایت‌های بازیافت پسماندهای الکترونیکی در نیجریه با استفاده از طیف‌بینی جذب اتمی انجام شد.	غلظت فلزات سنگین در تمام سایت‌های بررسی شده بیشتر از سایت کنترل بود. نتایج این بررسی نشان داد در مکان‌های انبار یا دفع و یا بازیافت پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی، پسماندهای الکترونیکی در آزادسازی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک و آب نقش دارند.
۱۰	Qihang و همکاران	۲۰۱۵	آلودگی خاک و آب اطراف یک سایت متروکه بازیافت پسماندهای الکترونیکی به فلزات سنگین و عوامل انتشار این فلزات را در محیط بررسی کردند.	خاک سطحی سایت‌ها به‌شدت به کادمیم و مس آلوده بوده و مقدار آن‌ها بسیار بیشتر از مقدار استاندارد بود. غلظت فلزات سنگین معمولاً با عمق سایت کاهش می‌یابد که این با افزایش pH و کاهش TOM در گرادیان عمق ارتباط دارد. آب دریاچه بسیار اسیدی و آلوده به فلزات سنگین بود، در حالی که آب چاه کمی آلوده بود. زیرا فلزات سنگین اغلب در خاک سطحی می‌مانند. استفاده از آب دریاچه برای آبیاری منجر به آلودگی خاک شالیزارها به فلزات سنگین شد.
۱۱	Zhao و همکاران	۲۰۱۵	در این پژوهش، انتشار فلزات سنگین از پسماند برد مدارهای چاپی با روش استخراج سه مرحله‌ای Bureau of Commune de Reference از European Union و روش استخراج ترتیبی ۵ مرحله‌ای بررسی شد.	سرعت استخراج فلزات سنگین با روش BCR از پسماندهای برد مدارهای چاپی بیشتر از روش تسیر است. نیکل موجود در این پسماندها به شکل رسوب بود و تأثیرش بر محیط ناچیز بود. در شرق چین، این دو فلز سنگین با بارش‌های اسیدی به‌آسانی در محیط منتشر می‌شوند. اگرچه نتایج باهم همخوانی ندارند، اما به دلیل مقدار زیاد مس در برد مدارهای چاپی، نمی‌توان از زیان مس آزاد شده از این نوع پسماندها به محیط چشم‌پوشی کرد.

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی عوامل موثر در جداسازی و انتشار عناصر سمی (کادمیوم) موجود در قطعات الکترونیکی و الکتریکی پس از رهاسازی در محیط زیست (محیط آبی) است.

### مواد و روش‌ها روش‌شناسی

ابتدا قطعات متعدد و متنوعی از برد الکترونیک تا حد امکان به قطعات ریز تبدیل گردید. سپس نصف مقدار نمونه با ترازو وزن شده (۲۱۵/۲۱g) و در بشر یک لیتری ریخته شد و ۳۰۰ میلی لیتر نیتریک اسید غلیظ ۶۵ درصد به آن اضافه شد و گاز خرمایی رنگ نیتروژن دی اکسید متصاعد گردید. نمونه به مدت ۴۵ دقیقه در همان حال نگهداری شد تا قطعات فلزی موجود در نمونه تا حد

امکان در محیط اسیدی حل شوند که در نهایت محلول سبز رنگ ایجاد شد. سپس ۳۰۰ میلی لیتر آب مقطر به محلول افزوده گردید و به مدت ۴۵ دقیقه نمونه جوشانده شد و در این مدت مرتباً هم زده شد. سپس نمونه با کیف صاف شد تا قطعات درشت جدا شود و با کاغذ صافی صاف گردید و محلول به دست آمده در بالن ریخته شد و با آب مقطر به حجم ۱۰۰۰ میلی لیتر رسانده شد. پس از آماده سازی با دستگاه جذب اتمی در صد عناصر موجود در نمونه ها اندازه گیری شد. از بین عناصر شناسایی شده، عنصر کادمیوم انتخاب و تاثیر pH، دما، ترکیبات هامیک و زمان بر روی آن در محیط‌های آبی بررسی شد. جدول (۲)، جزئیات شرایط محیطی و پارامترهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- جزئیات مربوط به روش آماده‌سازی و اندازه‌گیری میزان آزادسازی عناصر مورد سنجش در شرایط آبی

روش کار	پارامتر مورد بررسی
۳۰ گرم قطعه برد الکترونیک را در بشر ریخته و ۸۰۰cc آب به آن اضافه گردید. با استفاده از HCl یک مولار و NaOH یک مولار، pHهای مورد نظر در دمای ۲۵C° در محلول نمونه ایجاد شد و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در همان حالت باقی ماند و سپس صاف گردید. سپس با استفاده از دستگاه جذب اتمی مقدار عنصر آزاد شده کادمیوم در آب اندازه‌گیری شد.	pH
برای بررسی اثر دما در آزادسازی فلزات، همانند روش بالا نمونه در pHهای ۴، ۷ و ۱۰ آماده شد و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دماهای متفاوت در دستگاه انکوباتور نگهداری شدند. سپس با استفاده از دستگاه جذب اتمی میزان عنصر آزاد شده اندازه‌گیری شد.	دما
ترکیبات هامیک ترکیبات فنولی حاصل از کمپوست‌ها هستند که خاصیت اسیدی و کمپلکس‌کنندگی داشته و حضورشان در آب و خاک باعث می‌شود که یون‌های فلزی بیشتر در آب کشیده شوند. این ترکیبات از خانواده کاتکول‌ها می‌باشد. برای بررسی اثر ترکیبات هامیک ۳۰ گرم قطعه برد الکترونیکی به همراه ۸۰۰cc آب مخلوط کرده و نمونه‌ها با استفاده از HCl و NaOH یک مولار در pHهای ۴، ۷ و ۱۰ آماده شدند. سپس مقادیر متفاوت از کاتکول که به عنوان نماد ترکیبات هامیک می‌باشد به	ترکیبات هامیک

جدول ۲- جزئیات مربوط به روش آماده‌سازی و اندازه‌گیری میزان آزادسازی عناصر مورد سنجش در شرایط آبی

محلول‌ها اضافه شده و در دمای $25^{\circ}\text{C}$ به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند و سپس با دستگاه جذب اتمی میزان آزادسازی کادمیوم در آب اندازه‌گیری شد.	
برای بررسی تاثیر زمان در آزادسازی عنصر نیز ۳۰ گرم قطعه برد الکترونیکی به همراه $800\text{CC}$ آب مخلوط شده و نمونه‌ها با استفاده از $\text{HCl}$ و $\text{NaOH}$ یک مولار در pHهای ۴، ۷ و ۱۰ آماده شدند. سپس محلول‌ها در بازه‌های زمانی ۲۴ ساعت، یک هفته، سه هفته و یک ماه در دمای $25^{\circ}\text{C}$ نگهداری شده و بعد از اتمام دوره با استفاده از دستگاه جذب اتمی، میزان آزادسازی کادمیوم در محلول اندازه‌گیری شدند.	زمان

### نتایج

میزان کادمیوم اندازه‌گیری شده در نمونه پسماند الکترونیکی مورد مطالعه،  $3/784$  میلی‌گرم بر لیتر بوده است و این در حالیست که در استاندارد آب آشامیدنی در کشور، حداکثر مجاز برای این عنصر  $0/003$  میلی‌گرم بر لیتر قید شده است.

### تاثیر کمیت‌های مختلف بر میزان نفوذ عنصر

کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط‌های آبی

#### الف) pH

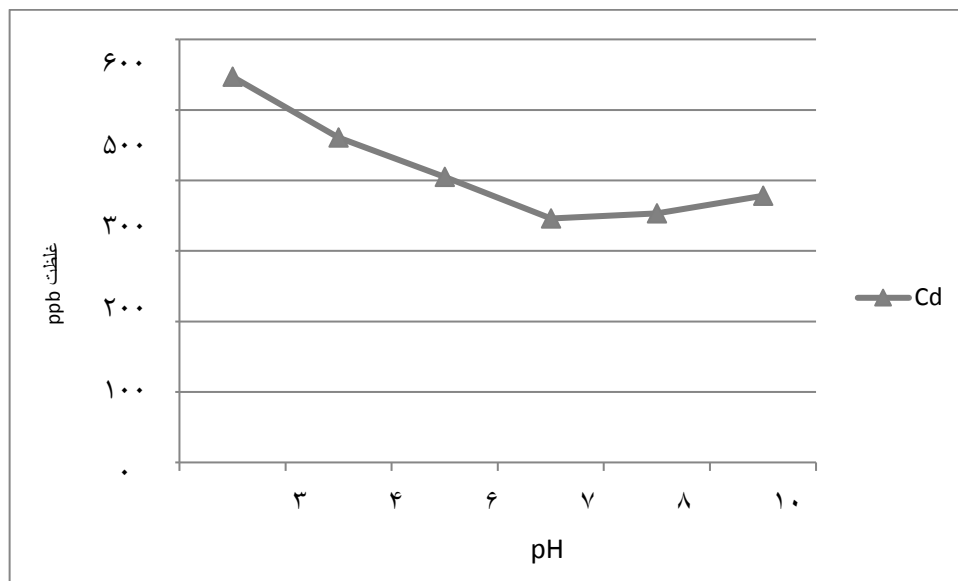
جدول شماره (۳) نتایج حاصل از نفوذ عنصر کادمیوم از قطعه برد الکترونیکی مورد آزمایش به محیط آبی در pHهای متفاوت را نشان می‌دهد.

جدول ۳- تاثیر pH مختلف بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط‌های آبی

pH	۳	۴	۶	۷	۸	۱۰
C Cd (ppb)	۵۴۷	۴۶۱	۴۰۵	۳۴۶	۳۵۳	۳۷۸

با توجه به آزمون‌های انجام شده و ارقام به دست آمده، تغییرات میزان نفوذ در شکل (۱) نمایش داده شده است. همانگونه که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد، از pH اسیدی تا خنثی میزان آزادسازی فلز سنگین کادمیوم

کاهش می‌یابد ولی در محدوده قلیایی این فلزات با  $\text{OH}^-$  تشکیل کمپلکس داده و مجدداً میزان این عنصر افزایش می‌یابد.



شکل ۱- نمودار تاثیر pH مختلف بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط‌های آبی

جدول شماره (۴)، روند میزان نفوذ عنصر کادمیوم از قطعه (ب) دما  
 برد الکترونیکی به محیط آبی را در سه محدوده pH اسیدی، خنثی و بازی در دماهای متفاوت نشان می‌دهند.

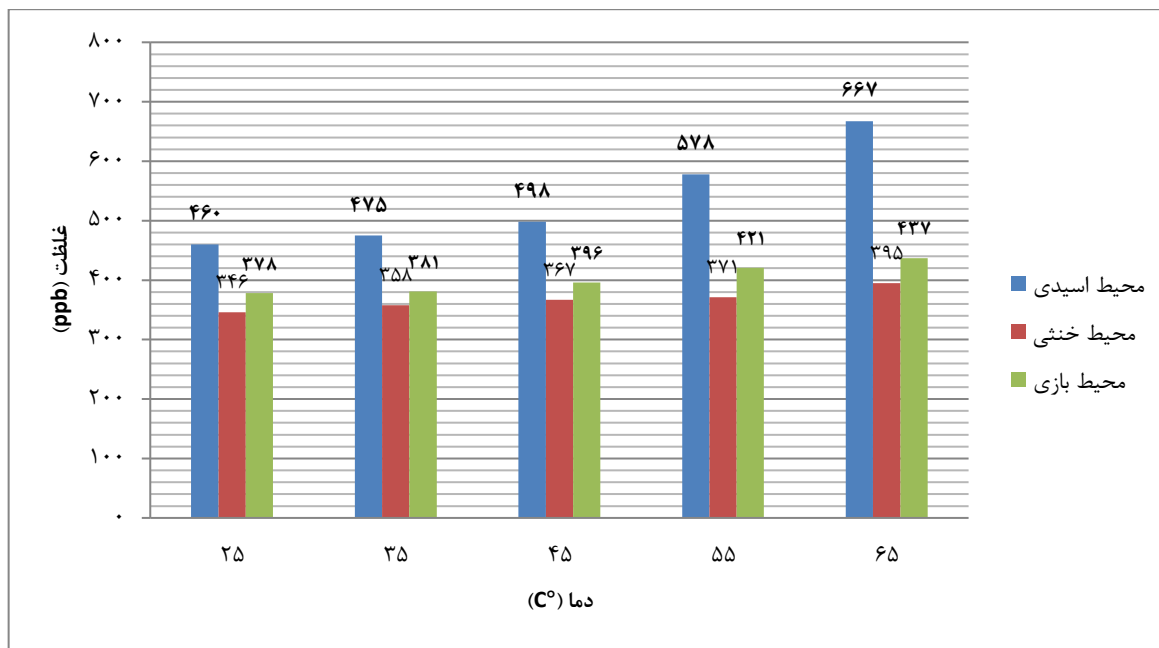
جدول ۴- تاثیر دما بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط‌های آبی در شرایط اسیدی، خنثی و بازی

t (°c)	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵	۶۵
<b>pH= ۴</b>					
<b>C Cd (ppb)</b>	۴۶۰	۴۷۵	۴۹۸	۵۷۸	۶۶۷
<b>pH= ۷</b>					
<b>C Cd (ppb)</b>	۳۴۶	۳۵۸	۳۶۷	۳۷۱	۳۹۵
<b>pH= ۱۰</b>					
<b>C Cd (ppb)</b>	۳۷۸	۳۸۱	۳۹۶	۴۲۱	۴۳۷

نتیجه میزان آزادسازی عنصر بالا می‌رود. هر چه محیط اسیدی‌تر شود، آنیون اسید راحت‌تر با عناصر موجود تشکیل کمپلکس داده و میزان آزادسازی عنصر افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج به دست آمده از تست‌های صورت گرفته، رابطه مستقیم بین افزایش دما و افزایش میزان نفوذ عنصر کادمیوم در هر سه محدوده اسیدی، خنثی و بازی وجود دارد. افزایش دما باعث افزایش تحرک مولکول‌ها شده و در





شکل ۲- نمودار تاثیر دما بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط‌های آبی در شرایط اسیدی، خنثی و بازی

#### پ) ترکیبات هامیک

جداول شماره (۵) روند میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی در محیط آبی با حضور ترکیبات هامیک، در محدوده‌های pH اسیدی، خنثی و بازی را

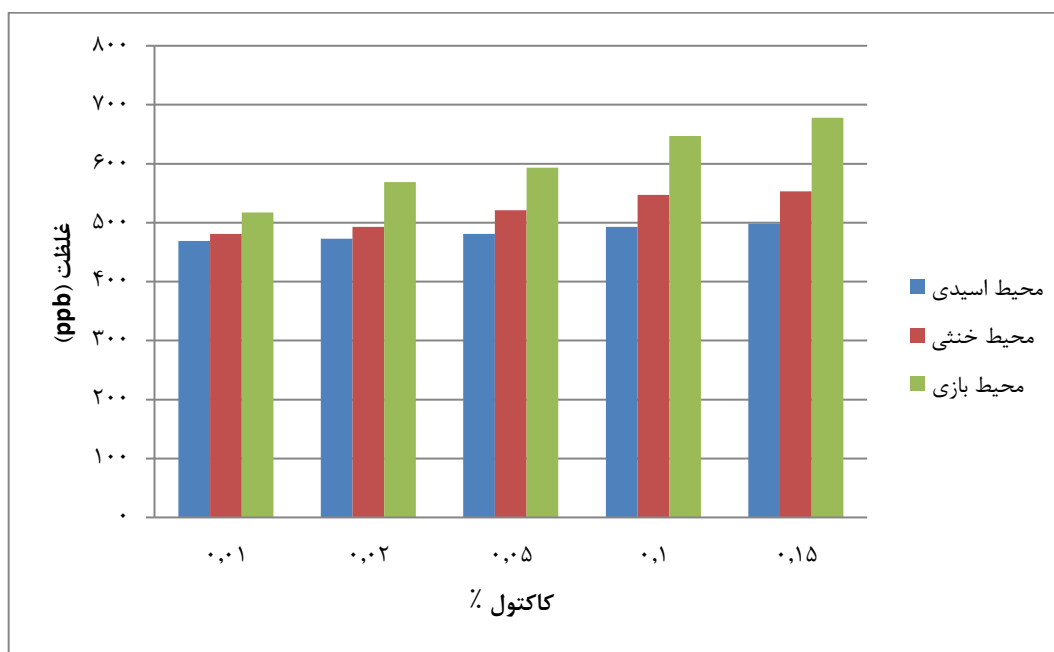
نشان می‌دهد. ترکیبات هامیک کمپلکس‌ساز می‌باشند. هرچه محیط قلیایی‌تر شود آنیون قوی‌تری ساخته شده و کمپلکس قوی‌تر تشکیل می‌شود و در نتیجه اثر ترکیبات هامیک نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۵- تاثیر ترکیبات هامیک بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط‌های آبی در شرایط اسیدی، خنثی و بازی

(w/v) % کاتول	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵
<b>pH= ۴</b>					
C Cd (ppb)	۴۶۹	۴۷۳	۴۸۱	۴۹۳	۴۹۸
<b>pH= ۷</b>					
C Cd (ppb)	۴۸۱	۴۹۳	۵۲۱	۵۴۷	۵۵۳
<b>pH= ۱۰</b>					
C Cd (ppb)	۵۱۷	۵۶۹	۵۹۳	۶۴۷	۶۷۸

میان افزایش میزان ترکیبات هامیک و نفوذ عنصر کادمیوم در محیط آبی وجود دارد. شکل شماره (۳) روند تاثیرگذاری ترکیبات هامیک در محیط‌های مختلف را نمایش می دهد.

بر اساس جدول شماره (۵) در هر سه محدوده pH، با افزایش میزان ترکیبات هامیک، میزان نفوذ کادمیوم به محیط آبی نیز افزایش می یابد. به عبارتی رابطه مستقیم



شکل ۳- نمودار تاثیر ترکیبات هامیک بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط‌های آبی در شرایط اسیدی، خنثی و بازی

ت) زمان

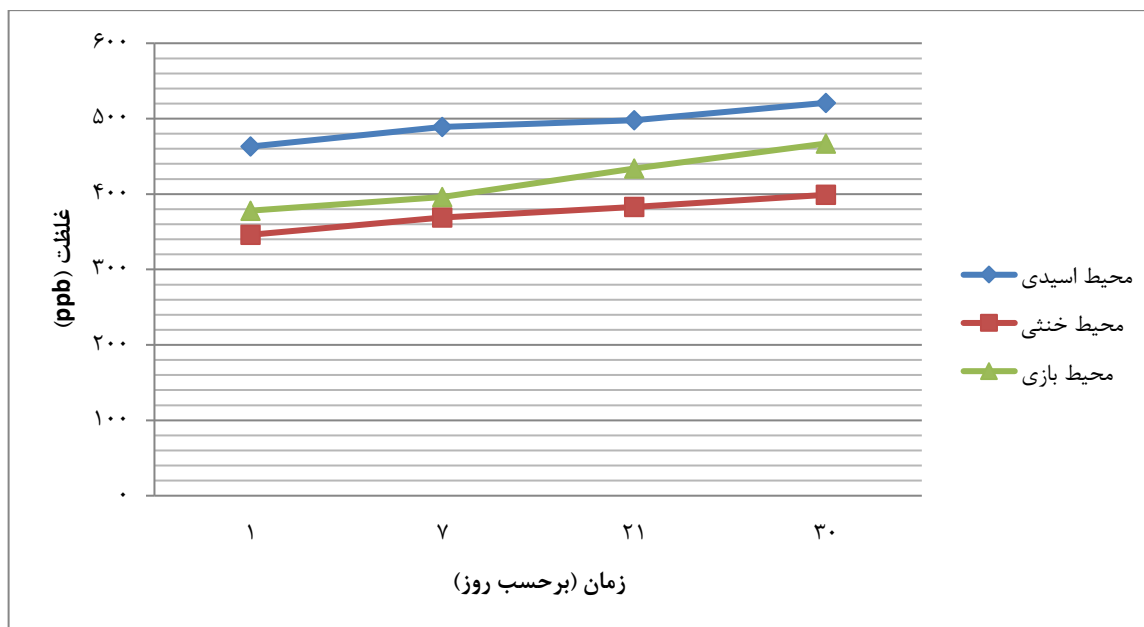
مشاهدات صورت گرفته از تاثیر زمان بر میزان نفوذ کادمیوم در محیط آبی در جدول (۶) ثبت گردیده است.

جدول ۶- تاثیر زمان بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیطهای آبی در شرایط اسیدی، خنثی و بازی

زمان (روز)	۱	۷	۲۱	۳۰
<b>pH= ۴</b>				
C Cd (ppb)	۴۶۳	۴۸۹	۴۹۸	۵۲۱
<b>pH= ۷</b>				
C Cd (ppb)	۳۴۶	۳۶۹	۳۸۳	۳۹۹
<b>pH= ۱۰</b>				
C Cd (ppb)	۳۷۸	۳۹۶	۴۳۴	۴۶۷

نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل شماره (۴) مشخص است، در pH خنثی این آزادسازی از سایر موارد کمتر است.

طبق مشاهدات صورت گرفته در بازه‌های زمانی متفاوت در pHهای اسیدی، خنثی و بازی، با افزایش زمان تماس قطعات الکترونیکی با محیط، میزان نفوذ عنصر کادمیوم



شکل ۴- تاثیر زمان بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به آبی در محیطهای اسیدی، خنثی و بازی

### بحث و نتیجه‌گیری

امروزه از روش‌های مختلفی برای مدیریت پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی استفاده می‌شود. از قبیل سوزاندن، دفن و بازیافت که البته هر یک مشکلات خاص خود را دارد، از جمله، روش سوزاندن منجر به تولید دی‌اکسیدها، فوران‌ها، هیدروکربن‌های آروماتیک چند هسته‌ای (PAHs)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند هالوژنه (PHAHs) و هیدروژن کلراید می‌گردد. به منظور انتخاب و به کارگیری روش هوشمندانه و موثر برای مدیریت این نوع از فلزات سنگین، در ابتدا لازم است تا عوامل موثر بر آزادسازی و انتشار آنها در محیط بازناسایی شوند.

با توجه به آزمایشات انجام شده و بررسی عوامل مختلف بر میزان آزادسازی این عنصر و نتایج حاصل می‌توان گفت که افزایش عواملی مانند دما، ترکیبات هامیک و زمان در محیط‌های آبی باعث افزایش نفوذ کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط زیست خواهد شد. درباره pH نیز با افزایش واحد (حرکت از محیط اسیدی به خنثی)، میزان آزادسازی عنصر کمتر می‌گردد، ولیکن با حرکت از حالت خنثی به سمت محیط بازی (قلیایی)، میزان آزادسازی کادمیوم افزایش می‌یابد. رابطه میان دما و pH روابط زیر برقرار است

جدول ۷- رابطه میان آزادسازی عنصر کادمیوم در اثر افزایش دما و pH مختلف محیطی

معادله حاکم بر رابطه میان پارامترها	افزایش دما	pH محیط
$y = 15.8x + 335.2 (R^2 = 0.9466)$	از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۶۵ درجه سانتی‌گراد	قلیایی
$y = 11.1x + 334.1 (R^2 = 0.9326)$	//	خنثی
$y = 51.7x + 380.5 (R^2 = 0.895)$	//	اسیدی

همکاران (۲۰۱۵) و Qihang و همکاران (۲۰۱۵)، مشابه می‌باشد. از سوی دیگر، نتایج حاصل از این تحقیق، با نتایج تحقیقات Guo و همکاران (۲۰۰۹)، مطابقت دارد. در این تحقیق، مشخص شد که میزان عنصر کادمیوم در خاک مناطق مورد مطالعه از حد استاندارد بالاتر بوده و می‌تواند احتمال خطر ناشی از مسمومیت را افزایش دهد. همچنین؛ نتایج تحقیقات Song و همکاران (۲۰۱۴) که بیانگر لزوم رعایت ملاحظات اساسی در بازیافت فلزات سنگین از جمله کادمیوم می‌باشد، با نتایج تحقیق حاضر هم‌راستا و مرتبط است.

در اصل می‌توان چنین عنوان نمود که اسیدی شدن محیط آبی، و یا بالا رفتن دمای محیط (آلودگی حرارتی)، سبب افزایش جداسازی کادمیوم و بالا رفتن درصد نفوذ آن می‌شوند.

نتایج این تحقیق، با تحقیقات Huang و همکاران (۲۰۱۴)، Xinhui و همکاران (۲۰۱۰) و نیز Michael و همکاران (۲۰۱۳)، هم‌راستا است. چرا که نتایج آنها بیانگر آن بوده است که میزان آزادسازی کادمیوم با pH رابطه نزدیک دارد که در این تحقیق نیز این مورد تایید گردید. همچنین، نتایج تحقیق حاضر با مطالعات Zeine و

- Ghana. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 229: 19-34.
- Lide, D. R. 2000. Magnetic susceptibility of the elements and inorganic compounds: in *Handbook of Chemistry and Physics* 81st edition, CRC press.
- Manc, G. 1987. Pollution threat of heavy metals in aquatic environments. 1st Ed., Elsevier Science Publishers, New York.
- Michael, C. & Sugumar, R. W. 2013. Studies on Leaching of Heavy Metals from E-waste. *Oriental Journal of Chemistry*, 29(03):1149-1154.
- Nnorom, I. CH., Osibanjo, O., Okechukwu1, K., Nkwachukwu1, O. & Chukwuma, R.C. 2010. Evaluation of Heavy Metal Release from the Disposal of Waste Computer Monitors at an Open Dump. *International Journal of Environmental Science and Development*, 1(3):227-233.
- Ofudje, E. A., Alayande, S. O., Oladipo, G. O., Williams, O. D. & Akiode, O. K. 2014. Heavy Metals Concentration at Electronic- Waste Dismantling Sites and Dumpsites in Lagos, Nigeria. *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry*, 4(6): 678-690.
- Qihang, W., Leung, j., Xinhua, G., Shejun, Ch., Xuexia, H., Haiyan, L., Zhuying, H., Libin, Z., Jiahao, Ch. & Yayin, L. 2015. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of the Total Environment*, 506-507: 217-225.
- منابع  
 احمدی. ب. ۱۳۸۷. بررسی نقش فلزات سنگین بر سلامتی انسان. شرکت آب منطقه‌ای زنجان. ایران.  
 اسدی. م.، فائزی رازی. د.، نبی‌زاده. ر. و وجدانی. م.، ۱۳۷۷. مدیریت مواد زائد خطرناک، انتشارات سازمان حفاظت محیط زیست، تهران. ایران.  
 آموزشی، ف.، مظفری، ع. و محمدی، ف. ۱۳۸۷. بررسی بازیافت ضایعات الکترونیکی و راهکارهای آن. چهارمین همایش ملی مدیریت پسماند. ایران.  
 موسوی، س. ع.، خاموئیان، ر. و پروانه، م. ۱۳۹۲. بررسی وضعیت مدیریت پسماندهای الکترونیکی در دنیا و ایران. اولین نمایشگاه و سمینار محیط زیست، انرژی و صنعت، ایران.  
 نجفی، ع. ۱۳۹۰. مدیریت پسماندهای الکترونیکی و بررسی نقش آن در حفاظت از محیط زیست. پنجمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، ایران.  
 Amfo-Otu1, R., Kwesi Bentum, J. & Omari, S. 2013. Assessment of Soil Contamination through E-Waste Recycling Activities in Tema Community One. *Environment and Pollution*, 2(2): 66-70.  
 Bizzo, W. A., Figueiredo, R. A. & Andrade, V. F. 2014. Characterization of Printed Circuit Boards for Metal and Energy Recovery after Milling and Mechanical Separation. *Materials*, 7: 4555-4566.  
 Guo, Y., Huang, C., Zhang, H. & Dong, Q. 2009. Heavy metal contamination from electronic waste recycling at Guiyu, Southeastern China. *Journal of Environmental Quality*, 38(4):1617-1626.  
 Huang, J., Nkrumah, P., Anim, D. & Mensah, E. 2014. E-Waste disposal effects on the aquatic environment: A,

- China. *Atmospheric Environment*, 44(35): 4440-4445.
- Zeine, W. 2015. Environmental impact assessment of waste electronic and electric equipment (WEEE) management practices in developing countries through leaching tests. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 9(8): 671-681.
- Song, Q. & Li, J. 2014. Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: a systematic review. *Waste Management*, 34(12):2587-94.
- Xinhui, B., Bernd, S., ZhenZhen, W., Xinming, W., Guoying, SH. & Jiamo, F. 2010. The major components of particles emitted during recycling of waste printed circuit boards in a typical e-waste workshop of South

## Study of Some of the Environmental Impact Parameters on the Release of Cadmium from Electronic Waste in Aquatic Environments

Bahmanpour<sup>1\*</sup>, H., Zaeimdar<sup>2</sup>, M. & Rahimi<sup>3</sup>, M.

1. Dept. of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Shahrood Branch
2. Dept. of Environmental Science, Islamic Azad University, Tehran North Branch
3. Dept. of Environment, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Shahrood Branch,

---

### Abstract

Electronic and electrical wastes are special types of wastes, the main components of which include capacitors, transistors, ICs, electronic circuits, cathode and anode components have toxic and pathogenic properties and are stable in the environment and even in body of animal, are corrosive to installations and equipment. The purpose of this study is to investigate and identify the effective factors in the liberation of metals, in particular cadmium, in the surrounding environment. Accordingly, the effect of different factors such as temperature, pH, humic acid and time on the release of cadmium from these wastes to aquatic environments has been studied. For this purpose, the selected parts were analyzed and examined. The results indicate that in the aqueous medium, the amount of cadmium penetration in the very acidic and very alkaline pH, the release rate increases. Also, in the aqueous medium, the increase in temperature increases the penetration of cadmium in the environment, and the effect of the contact time parameter is also proportional to the pH variation.

**Key words:** E-waste, cadmium, pH, aquatic environment

\*Corresponding author: h.bahmanpour@srbiau.ac.ir