

## سنجش میزان آزادسازی و نفوذ فلزات سنگین موجود در پسماندهای الکترونیکی در خاک

مرضیه رحیمی<sup>۱</sup>، هومن بهمن پور<sup>۲</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، شاهرود، ایران

(دانش آموخته کارشناسی ارشد)

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، دانشکده علوم پایه، گروه محیط زیست، شاهرود، ایران (استادیار)

عده دار مکاتبات [Hooman.bahmanpour@yahoo.com](mailto:Hooman.bahmanpour@yahoo.com)

### چکیده

پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی انواعی از پسماندهای ویژه می باشند که قطعات اصلی آنها شامل خازن، ترانزیستور، آی.سی، مدارات الکترونیکی، قطعات کاتدی و آندی بوده و دارای خاصیت سمیت، بیماری زایی و پایایی در محیط پیرامون و حتی در پیکره جانداران، خورندگی تاسیسات و تجهیزات و مشابه آن می باشند. بر این اساس، هدف از این تحقیق بررسی و شناسایی عوامل موثر در آزادسازی این فلزات و اختصاصاً عنصر کادمیوم در محیط پیرامون می باشد. جهت بررسی این موضوع تاثیر عوامل مختلف مانند دما، pH، ترکیبات هامیک و زمان بر روی آزادسازی عنصر کادمیوم از اینگونه پسماندها به محیط های خاکی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور قطعات انتخابی آنالیز گردیده و مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بیانگر آن بوده است که در محیط خاکی، میزان آزادسازی و نفوذ کادمیوم در pH بسیار اسیدی و بسیار قلیایی افزایش می یابد. همچنین؛ افزایش پارامترهای دیگر، نظیر دما، زمان و ترکیبات هامیک سبب افزایش میزان نفوذ عنصر کادمیوم در محیط می گردد.

**واژگان کلیدی:** پسماند الکترونیکی، فلزات سنگین، کادمیوم، ترکیبات هامیک، pH، محیط خاکی

### ۱- مقدمه

پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی انواعی از پسماندهای ویژه است که دارای خاصیت سمیت، بیماری زایی و پایایی در محیط پیرامون و حتی در پیکره جانداران، خورندگی و مشابه آن می باشند و در اصل، به پسماندهای ویژه ای گفته می شود که غالب قطعات اصلی آنها شامل خازن، ترانزیستور، آی.سی، مدارات الکترونیکی، قطعات کاتدی و آندی و از این قبیل می باشد (نجفی، ۱۳۹۰: ۱۷۸). بطور کلی این پسماندها به دو دسته الکتریکی مانند باتری، یخچال، ماشین لباسشویی، اتو، لامپ، ... و الکترونیکی مثل کلیه قطعات رایانه ای، دستگاه های رادیویی و تلویزیون، انواع پخش کننده های صوتی و تصویری، ... تقسیم می شوند.

این نوع پسماند مشکلی است که به تازگی در حال پدیدار شدن می باشد و همچنین به عنوان یک فرصت شغلی که دارای اهمیت روزافزون است نیز تلقی می شود. حجم زیادی از پسماندهای الکترونیکی تولید شده در جهان می تواند حاوی مواد سمی و همچنین مواد با ارزش باشد. از تجزیه این مواد، آهن، مس، آلومینیوم، طلا و دیگر مواد به دست می آید که متجاوز از ۶۰٪ می باشد.

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 (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 (موسوی و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۶-۳۴).

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 به‌طور تقریبی محاسبه کرد که ۴ میلیون رایانه از دور خارج شده، حاوی چه حجم عظیمی از عناصر خطرناک و در کنار آن دارای چه عناصری ارزشمند مانند طلا و نقره است که باز یافت 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: ۱۸۰؛ اسدی و همکاران، ۱۳۷۷: ۶۷).

فلزات سنگین به هر عنصر شیمیایی فلزی که دارای چگالی نسبتاً زیادی باشد و همچنین در غلظت‌های پایین سمی باشند، اطلاق می‌شود. 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 نمایند (مانک، ۱۹۸۷: ۴۰). سرب موجود در CRT رایانه‌ها یا لامپ اشعه کاتی، 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: ۱۷۹).

رشد سریع آلودگی‌های الکترونیکی و ورود سریع و بی‌رویه آنها به محیط‌زیست، امروزه به‌صورت 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: ۱۱).

مدیریت دفع این مواد به دلیل دشواری جداسازی و ناکافی بودن تحقیقات در زمینه فرایند باز یافت آنها با چالش مواجه است. به‌عنوان نمونه، خطرات فلزات سنگین بر روی انسان آسیب به اندام‌های حساس نظیر کلیه و کبد می‌باشد و پلاستیک‌ها در صورت زباله‌سوزی تولید گروه گازهای دی‌اکسید و فوران می‌نمایند، که سرطان‌زایی آنها قطعی است. انتخاب شیوه‌های جمع‌آوری، جداسازی، پردازش، باز یافت 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: ۲۲). هدف اصلی این تحقیق، بررسی عوامل مؤثر در جداسازی و انتشار عناصر سمی (کادمیوم) موجود در قطعات الکترونیکی و الکتریکی پس از رهاسازی در محیط زیست (محیط خاکی) است.

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

جدول (۱): خلاصه تحقیقات مرتبط در زمینه اثرات زیست محیطی پسماندهای الکترونیکی و الکتریکی

ردیف	محقق / محققان	سال	موضوع بررسی	نتایج
۱	نورم <sup>۱</sup> 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 الکترولیت های ضعیف شسته شد (۷).
۲	گوآ <sup>۲</sup> و همکاران	۲۰۰۹	تأثیر بازیافت زیاله های الکترونیکی در گوئیو، واقع در جنوب شرق چین، بر آلودگی سیستم آبی اطراف به فلزات سنگین بررسی کردند. غلظت های Cu, Pb, Ni, Cd, Hg را در نمونه های جمع آوری شده از رودخانه لیانژیانگ بررسی کردند.	نتایج نشان داد غلظت فلزات سنگین در فصل بارندگی زیاد و در فصل خشک کم است. غلظت مس در آب های سطحی ناحیه ۲/۴ تا ۱۳۱ تا برابر غلظت مرجع بود و پس از مس به ترتیب Ni, Cd, Pb, Hg, As بیشترین غلظت را داشتند. با وجود این، در مقایسه با استاندارد زیست محیطی چین، ابتدا کادمیم و سپس Pb و Hg و مس به عنوان مضرترین عناصر شناخته شدند. غلظت مس در نمونه های رسوبی ۳/۲ تا ۴۲۹ برابر غلظت مرجع بود و پس از مس به ترتیب Ni, Hg, Pb, Cd و As بیشترین غلظت را داشتند (۸).
۳	هوانگ <sup>۳</sup> و همکاران	۲۰۱۴	بررسی اثرات دفع پسماندهای الکتریکی بر محیط های آبی در آکرای غنا	مقدار فلزات سنگینی مانند سرب، کادمیم، مس و روی در نمونه های آبی بسیار زیاد است. همچنین، روش های قدیمی بازیافت پسماندهای الکترونیکی نیز منجر به آزادسازی این فلزات سنگین می شود. سرعت فلزات سنگین و آلاینده های آزاد شده از پسماندهای الکترونیکی که به رسوبات می چسبند و از این طریق وارد محیط های آبی می شوند به شدت به pH بستگی دارد (۹).
۴	زین <sup>۴</sup> 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 (۱۰).
۵	مایکل <sup>۵</sup> و همکاران	۲۰۱۳	بررسی جداسازی فلزات سنگین از پسماندهای الکتریکی. نمونه آب های مختلف رودخانه های متفاوت را بررسی کردند و مقدار فلزات سنگین آزاد شده از پسماندهای الکتریکی را در آن ها اندازه گرفتند.	در این بررسی غلظت آرسنیک ۰/۰۵۳ ppm، کادمیم ۰/۰۱۱ ppm، سرب ۰/۰۴۲ ppm و جیوه ۰/۰۶۱ ppm بود. نتایج نشان داد اکثر فلزات تمایل به جداسازی دارند و میزان جداسازی آن ها به کیفیت آب بستگی دارد. در نتیجه جداسازی، پارامترهای فیزیکی - شیمیایی مانند pH، سختی و TDS <sub>۶</sub> نمونه های 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 (۱۱).

- 1 - Nnorom
- 2 - Guo
- 3 - Huang
- 4 - Zeine
- 5 - Michael
- 6 - Total dissolved solids

ردیف	محقق / محققان	سال	موضوع بررسی	نتایج
۶	سانگ <sup>۱</sup> 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 (۱۲).
۷	بیزو <sup>۲</sup> 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 (۱۳).
۸	آمفو اوتو <sup>۳</sup> و همکاران	۲۰۱۵	آلودگی خاک به فلزات سنگین آزاد شده از پسماندهای الکترونیکی را بررسی کردند. دو نمونه خاک را از ۶ سایت مختلف برای اندازه‌گیری لابرآوری 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 (۱۳).
۹	آمفو اوتو <sup>۴</sup> و همکاران	۲۰۱۵	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 (۱۴).
۱۰	کیهانگ <sup>۵</sup> و همکاران	۲۰۱۰	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 به شدت 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 (۱۵).
۱۱	شو <sup>۶</sup> و همکاران	۲۰۱۵	توزیع فلزات سنگین را در پسماند بردهای مدار چاپی بررسی کردند. در این پژوهش، انتشار فلزات سنگین از پسماند برد مدارهای چاپی با روش استخراج سه	نتایج نشان داد 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

- 1 - Song
- 2 - Bizzo
- 3 - Amfo-Otu
- 4 - Ofudje
- 5 - Qihang
- 6 - Zhao

ردیف	محقق / محققان	سال	موضوع بررسی	نتایج
			مرحله‌ای BCR <sup>۱</sup> از EU <sup>۲</sup> و روش استخراج ترتیبی ۵ مرحله‌ای بررسی شد.	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 (۱۶).

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- 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 (gr21/215) و در بشر یک لیتری ریخته شد و روی آن به اندازه 300 cc اسید نیتریک غلیظ ۶۵٪ (۱۴/۴ مولار) اضافه شد که گاز خرمایی رنگ دی اکسید نیتروژن 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 300 cc 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 تخت ریخته و با آب مقطر به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس با دستگاه جذب اتمی در صد عناصر موجود در آن اندازه‌گیری شد. از بین عناصر شناسایی شده، عنصر کادمیوم انتخاب و تاثیر pH، دما، ترکیبات هامیک و زمان بر روی آن در محیط‌های خاکی بررسی شد. جدول (۲)، جزییات شرایط محیطی و پارامترهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول (۲): جزییات مربوط به روش آماده‌سازی و اندازه‌گیری میزان آزادسازی عناصر مورد سنجش در شرایط خاکی

پارامتر مورد بررسی	شرح روش کار
pH	برای بررسی اثر pH در محیط خاکی، نمونه خاک مرطوب همانند بالا، در pHهای متفاوت آماده گردید و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت. سپس خاک را با ۵۰۰ cc محلول اسید نیتریک ۶ مولار (HNO <sub>3</sub> ) شستشو داده و صاف نموده و میزان عنصر وارد شده در محلول نهایی توسط دستگاه جذبی خوانده شد.
ترکیبات هامیک	۱ کیلوگرم خاک را با ۳۰ گرم قطعه الکترونیک و ۲۵۰ cc آب مقطر مخلوط نموده و با فسفریک اسید ۲ مولار (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) و یا CaO در pHهای مورد نظر تنظیم گردید. سپس مقادیر متفاوت از کاتکول را به نمونه‌ها اضافه کرده و در دمای ۲۵°C به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد و توسط دستگاه جذب اتمی میزان نفوذ عنصر ثبت گردید.
زمان	برای بررسی اثر زمان در میزان خروج عناصر در خاک نیز یک کیلوگرم خاک با ۳۰ گرم قطعه الکترونیک و ۲۵۰ cc آب مقطر مخلوط گردید و با فسفریک اسید ۲ مولار (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) و یا CaO در pHهای مدنظر تنظیم نموده و در دمای ۲۵°C به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد و با دستگاه جذب اتمی میزان نفوذ عنصر ثبت گردید.
رطوبت	برای تهیه خاک خشک ۱ کیلوگرم خاک با ۳۰ گرم قطعه الکترونیک مخلوط گردید و در pH حدود ۷/۵۹ به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد. سپس خاک با ۵۰۰ cc محلول اسید نیتریک ۶ مولار (HNO <sub>3</sub> ) شستشو داده شد و صاف شده و در نهایت توسط دستگاه جذب اتمی میزان عنصر خوانده شد. برای تهیه خاک مرطوب نیز همانند بالا عمل کرده با این تفاوت که به مخلوط خاک و قطعه الکترونیک ۲۵۰ cc آب مقطر نیز اضافه گردید.

### ۳- نتایج و بحث

میزان کادمیوم اندازه گیری شده در نمونه پسماند الکترونیکی مورد مطالعه، ۳/۷۸۴ میلی گرم بر لیتر بوده است و این در حالیست که در استاندارد آب آشامیدنی در کشور، حداکثر مجاز برای این عنصر ۰/۰۰۳ میلی گرم بر لیتر قید شده است .

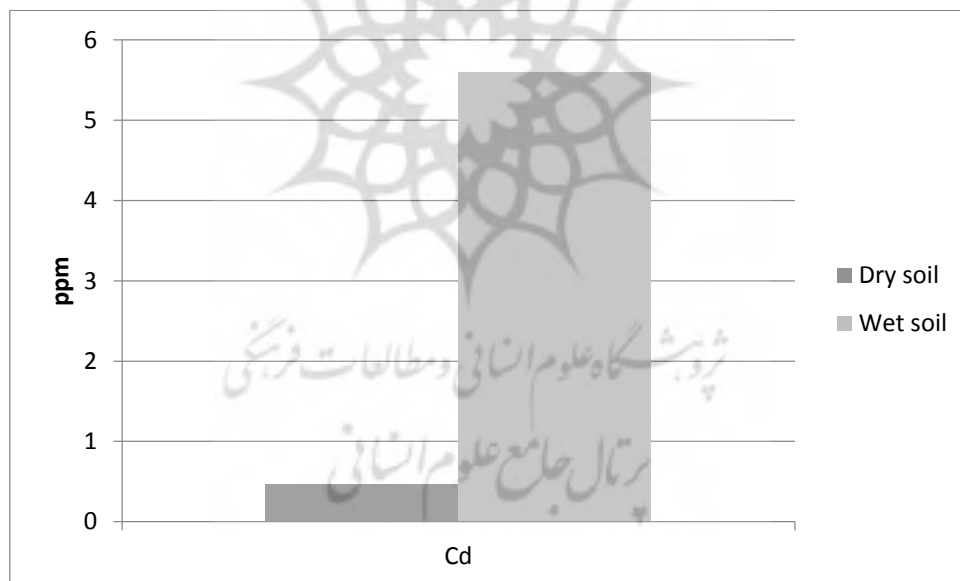
#### ۳-۱- تاثیر کمیت های مختلف بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط های خاکی (الف) رطوبت

جهت بررسی تاثیر رطوبت بر میزان نفوذ کادمیوم در محیط خاکی از خاک مرطوب با رطوبت ۲۵ درصد استفاده گردید و مشاهدات صورت گرفته در جدول ۳ ثبت گردیده است.

جدول (۳): تاثیر رطوبت بر میزان نفوذ کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط های خاکی

نوع خاک	خاک خشک	خاک مرطوب
Cd (ppm)	۰,۴۷۳	۵,۵۹۳

هر چه میزان رطوبت بیشتر باشد عوامل شیمیایی مانند اسیدی شدن، کمپلکس شدن و ... روی خوردگی فلزات تاثیر بیشتر گذاشته و در نتیجه میزان آزادسازی عناصر به محیط نیز افزایش می یابد.



شکل (۱): تاثیر رطوبت بر میزان نفوذ کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط های خاکی

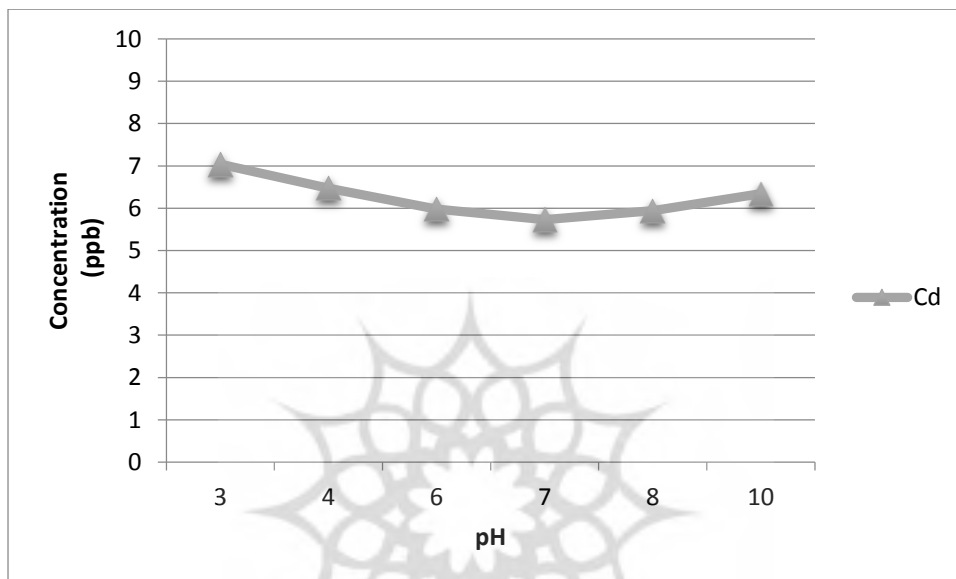
#### ب) pH

در مورد بررسی تاثیر pH بر میزان نفوذ کادمیوم در محیط خاکی از خاک مرطوب استفاده گردید و مشاهدات صورت گرفته در محدوده pH اسیدی، خنثی و بازی در جدول ۴ ثبت گردیده است.

جدول (۴): تاثیر pH مختلف بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیطهای خاکی

pH	۳	۴	۶	۷	۸	۱۰
C Cd (ppb)	۷,۰۳۷	۶,۴۷۳	۵,۹۸۳	۵,۷۳۱	۵,۹۳۸	۶,۳۴۱

با توجه به تستهای انجام شده و ارقام و اعداد به دست آمده تغییرات میزان نفوذ به صورت نمودار در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانگونه که در جدول ۴ مشاهده می گردد، از pH اسیدی تا خنثی میزان آزادسازی فلز سنگین کادمیوم کاهش می یابد ولی در محدوده قلیایی این فلزات با OH- تشکیل کمپلکس داده و مجدداً میزان این عنصر افزایش می یابد.



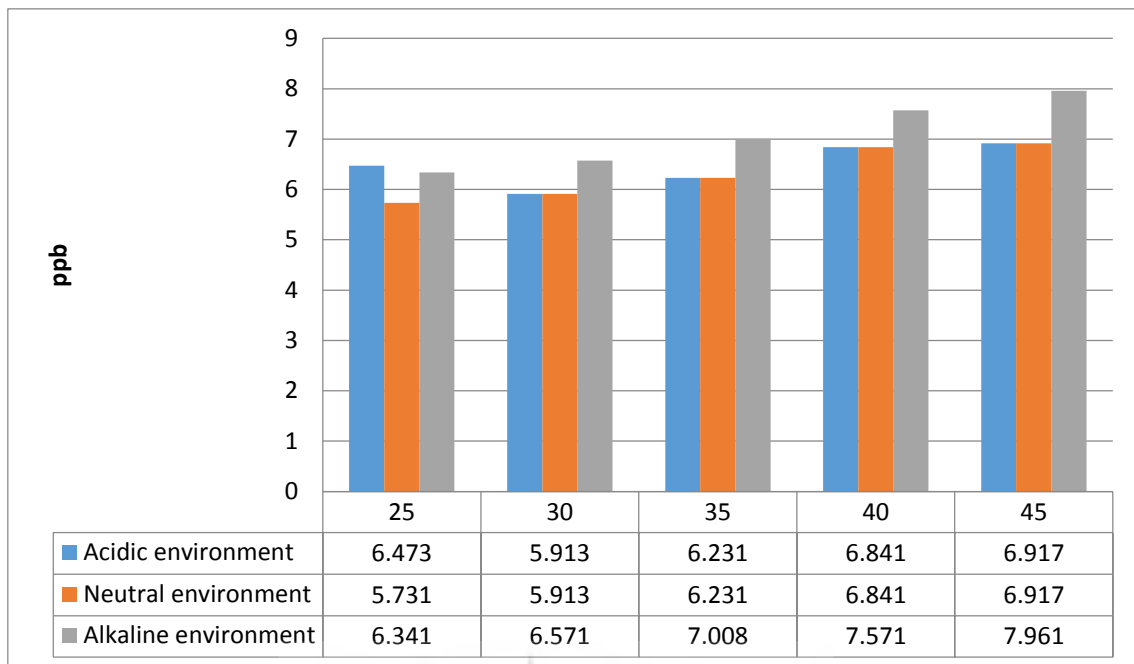
شکل (۲): نمودار تاثیر pH مختلف بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیطهای خاکی

### پ) دما

جدول ۵، روند میزان نفوذ عنصر کادمیوم از قطعه برد الکترونیکی به محیط خاکی را در سه محدوده pH اسیدی، خنثی و بازی در دماهای متفاوت نشان می دهند.

جدول (۵): تاثیر دما بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیطهای خاکی

T (°c)	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵
					pH= ۴
C Cd (ppb)	۶,۴۷۳	۵,۹۱۳	۶,۲۳۱	۶,۸۴۱	۶,۹۱۷
					pH= ۷
C Cd (ppb)	۵,۷۳۱	۵,۹۱۳	۶,۲۳۱	۶,۸۴۱	۶,۹۱۷
					pH= ۱۰
C Cd (ppb)	۶,۳۴۱	۶,۵۷۱	۷,۰۰۸	۷,۵۷۱	۷,۹۶۱



شکل (۳): نمودار تاثیر دما بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیطهای خاکی

در شرایط اسیدی، خنثی و بازی

### ت) ترکیبات هامیک

جدول شماره ۶ روند میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی در محیط خاکی با حضور ترکیبات هامیک، در محدوده‌های pH اسیدی، خنثی و بازی را نشان می‌دهد. ترکیبات هامیک کمپلکس ساز می‌باشند. هرچه محیط قلیایی تر شود آنیون قوی تری ساخته شده و کمپلکس قوی تر تشکیل می‌شود و در نتیجه اثر ترکیبات هامیک نیز افزایش می‌یابد.

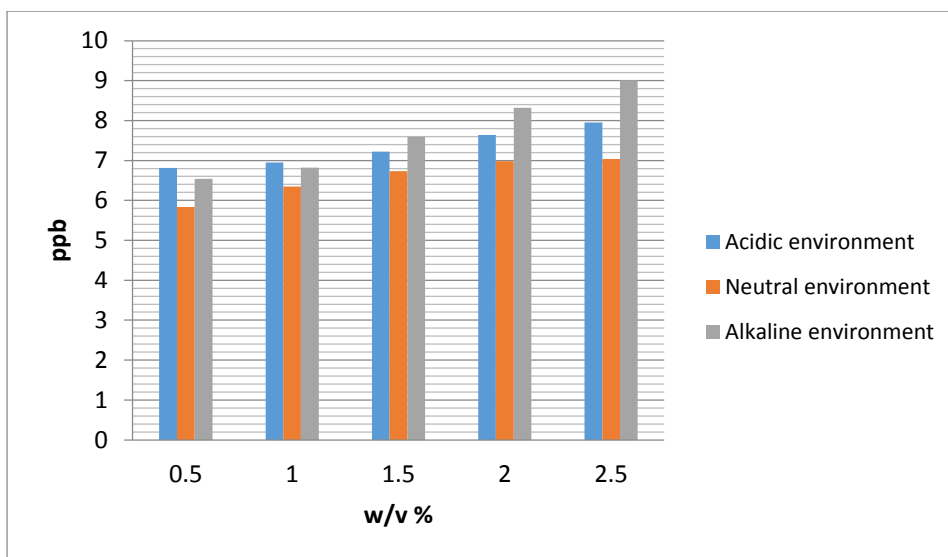
جدول (۶): تاثیر ترکیبات هامیک بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیطهای خاکی

در شرایط اسیدی، خنثی و بازی

کاتکول (w/v) %	۰,۵	۱,۵	۲	۲,۵
pH= ۴				
C Cd (ppb)	۶,۸۱۶	۶,۹۴۵	۷,۲۱۸	۷,۶۳۹
pH= ۷				
C Cd (ppb)	۵,۸۳۷	۶,۳۵۱	۶,۷۳۲	۶,۹۸۲
pH= ۱۰				
C Cd (ppb)	۶,۵۴۱	۶,۸۱۹	۷,۵۹۱	۸,۳۱۸

همانطور که ملاحظه می‌گردد در هر سه محدوده pH، با افزایش میزان ترکیبات هامیک، میزان نفوذ کادمیوم به محیط خاکی نیز افزایش می‌یابد. به عبارتی رابطه مستقیم میان افزایش میزان ترکیبات هامیک و نفوذ عنصر کادمیوم در محیط خاکی وجود دارد. شکل ۴، نمودار مربوط به روند تاثیرگذاری ترکیبات هامیک در شرایط مختلف می‌باشد.





شکل (۴): نمودار تاثیر ترکیبات هامیک بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیطهای خاکی در شرایط اسیدی، خنثی و بازی

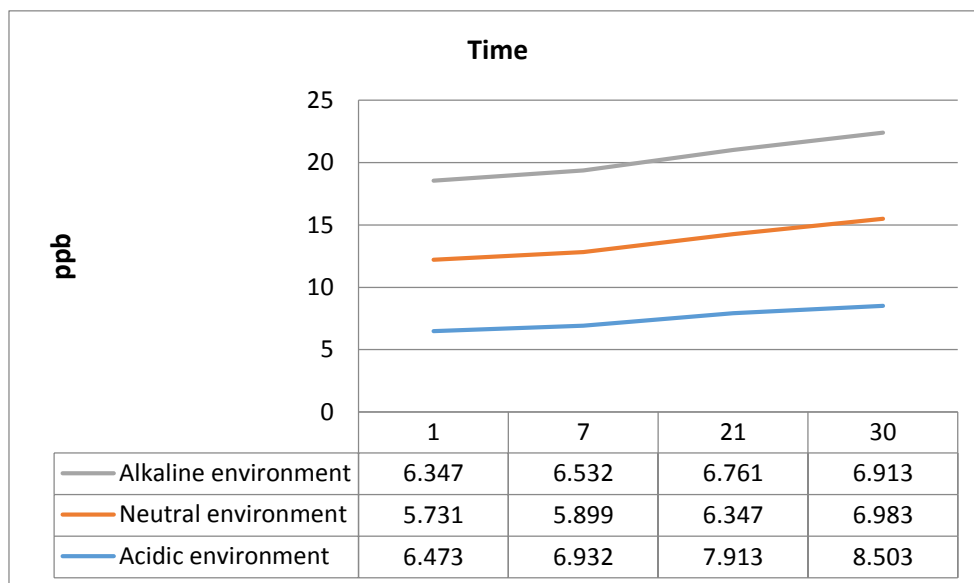
### ث) زمان

مشاهدات صورت گرفته از تاثیر زمان بر میزان نفوذ کادمیوم در محیط خاکی در جدول ۷ ثبت گردیده است.

جدول (۷): تاثیر زمان بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیطهای خاکی در شرایط اسیدی، خنثی و بازی

زمان (روز)	۱	۷	۲۱	۳۰
pH= ۴				
C Cd (ppb)	۶,۴۷۳	۶,۹۳۲	۷,۹۱۳	۸,۵۰۳
pH= ۷				
C Cd (ppb)	۵,۷۳۱	۵,۸۹۹	۶,۳۴۷	۶,۹۸۳
pH= ۱۰				
C Cd (ppb)	۶,۳۴۷	۶,۵۳۲	۶,۷۶۱	۶,۹۱۳

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

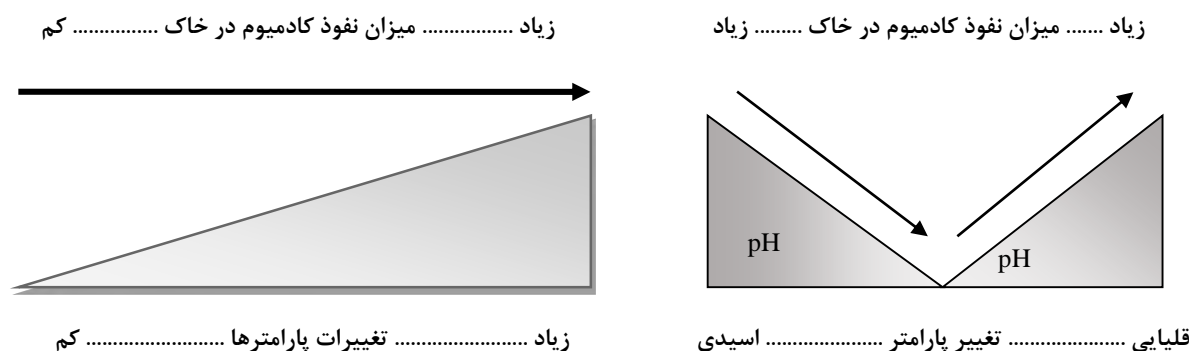


شکل (۵): تاثیر زمان بر میزان نفوذ عنصر کادمیوم از پسماندهای الکترونیکی به محیط خاکی در محیط‌های اسیدی، خنثی و بازی

## نتیجه‌گیری

کادمیم برای گیاهان، جانوران و انسان بسیار سمی می‌باشد و عملکرد بیوشیمیایی یا تغذیه‌ای آن شناخته نشده است. همانند سرب، کادمیم 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 کادمیم از طریق رژیم غذایی عمدتاً منجر به آسیب کلیه‌ها خواهد شد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که آسیب‌دیدگی کلیه‌ها در غلظت‌های پائین‌تر کادمیم نسبت به آنچه قبلاً پیش‌بینی شده بود اتفاق می‌افتد. دیگر اثرات کادمیم 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 کادمیم از طریق گردوغبار بر سیستم تنفسی تأثیر خواهد گذاشت. علاوه بر این، کادمیم و ترکیبات آن برای انسان سرطان‌زا شناخته شده‌اند که اولین اثرات آن به صورت سرطان ریه در اثر استنشاق گردوغبار آلوده به کادمیم دیده شده است. کادمیم در صورتی که در محیط آبی رها شود بیشتر از سایر فلزات در محیط حرکت می‌کند (موسوی و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۰).

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 دارا می‌باشند، از جمله، روش سوزاندن منجر به تولید دی‌اکسیدها، فوران‌ها، هیدروکربن‌های آروماتیک چندهسته‌ای (PAHs)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند هالوژنه (PHAHs) و هیدروژن کلراید می‌گردد. 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 خاکی باعث افزایش نفوذ کادمیم از پسماندهای الکترونیکی به محیط زیست خواهد شد. در مورد pH قضیه کمی متفاوت است. بدین صورت که 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 کادمیم افزایش می‌یابد. در اصل می‌توان چنین عنوان نمود که اسیدی شدن محیط آبی، و یا بالا رفتن دمای محیط (آلودگی حرارتی) سبب افزایش جداسازی کادمیم و بالا رفتن درصد نفوذ آن می‌شوند. شکل ۶، ارتباط میان تغییر پارامترهای گوناگون و میزان آزادسازی فلز سنگین کادمیم را در خاک به شکل شماتیک نشان می‌دهد.



شکل (۶): ارتباط میان آزادسازی کادمیوم در خاک متناسب با تغییر پارامترهای مورد بررسی

نتایج این تحقیق، با تحقیقات هوانگ و همکاران (۲۰۱۵)، زین و همکاران (۲۰۱۴)، مایکل و همکاران (۲۰۱۵) و کیهانگ و همکاران (۲۰۱۰) مشابه و هم راستا بوده و در برخی موارد نیز، با تحقیقات گوآ و همکاران (۲۰۱۵)، مشابهت داشته و مرتبط بوده است.

## منابع

۱. علی نجفی، مدیریت پسماندهای الکترونیکی و بررسی نقش آن در حفاظت از محیط زیست، پنجمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست، ۱۳۹۰
۲. سید علیرضا موسوی، راضیه خاموئیان، ملوک پروانه، بررسی وضعیت مدیریت پسماندهای الکترونیکی در دنیا و ایران، اولین نمایشگاه و سمینار محیط زیست، انرژی و صنعت یازدهم آذر ۱۳۹۲.
۳. اسدی، م، فائزی رازی، د، نبی زاده، ر، وجدانی، م، ۱۳۷۷. مدیریت مواد زائد خطرناک، انتشارات سازمان حفاظت محیط زیست، تهران. ۳۴۹ صفحه
۵. احمدی، ب، ۱۳۸۷. بررسی نقش فلزات سنگین بر سلامتی انسان، شرکت آب منطقه‌ای زنجان
۶. آموزشی، ف، مظفری، ع، محمدی، ف، ۱۳۸۷. بررسی بازیافت ضایعات الکترونیکی و راهکارهای آن. چهارمین همایش ملی مدیریت پسماند. کد مقاله ۱۷۴۸
4. Manc, G. 1987. Pollution threat of heavy metals in aquatic environments, 1st Ed., Elsevier Science Publishers, New York
7. 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. 2010;1:3.
8. Guo Y., Huang, C., Zhang, H., Dong, Q., 2009, Heavy metal contamination from electronic waste recycling at Guiyu, Southeastern China. J Environ Qual. 23; 38(4):1617-26.
9. Huang, J., Nkrumah, P., Anim, D., Mensah, E., 2014, E-waste disposal effects on the aquatic environment: A, Ghana. Rev Environ Contam Toxicol. 229:19-34 (WEEE) management practices in developing countries through leaching tests. African Journal.
10. Zeine, W., 2015, Environmental impact assessment of waste electronic and electric equipment of Environmental Science and Technology Full Length Research Paper, Vol. 9(8), pp. 671- 681.
11. Michael, C., Sugumar, R. W., 2013, Studies on Leaching of Heavy Metals from E ° waste. Oriental Journal of Chemistry, 09/2013; 29(03):1149-1154.
12. Song, Q., Li, J., 2014, Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: a systematic review. Waste Manag. 2014 Dec; 34(12):2587-94.
13. 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

14. Amfo-Otu1, A., Kwesi Bentum, J., Omari, S., 2013,. Assessment of Soil Contamination through E-Waste Recycling Activities in Tema Community One. Environment and Pollution; Vol. 2, 66-70.
15. 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 China. Atmospheric Environment, Volume 44, Issue 35, Pages 4440-4445.
16. 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, Volumes 506° 507, Pages 217-225.
17. Magnetic susceptibility of the elements and inorganic compounds, in Handbook of Chemistry and Physics 81st edition, CRC press.



## Determine the amount of release and penetration of heavy metals found in E-wastes in the soil

Marzieh Rahimi<sup>1</sup>, Hooman Bahmanpour<sup>2</sup>

1- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Shahrood Branch, Shahrood, Iran

2- Department of Environment, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Shahrood Branch, Shahrood, Iran

### Abstract

Electronic and electrical wastes are special types of wastes whose main components include capacitors, transistors, ICs, electronic circuits, cathode and anode components, and have toxicity, pathogenicity and stability in the environment and even in the body of living organisms, corrosive installations And equipment and the like. The purpose of this research is to investigate the effective factors in the release of heavy metal cadmium in the soil environment. For this purpose, the effect of various parameters such as temperature, pH, time and humic compounds on the release of cadmium from E-wastes to soil environments was studied. The results indicate that in soil, the level of cadmium penetration in very acidic and very alkaline pH increases the amount of release. Also, increasing the parameters in soil environments will increase the cadmium penetration of the E-waste into the environment.

**Keywords:** E-waste, cadmium, heavy metals, soil environment

