

گزارش خلاصه مدیریتی پروژه

استحصال فلزات گرانبها، نادر و استراتژیک از ضایعات الکتریکی و الکترونیکی

مدیریت آموزش، پژوهش و فناوری





**استحصال فلزات گرانبها، نادر و استراتژیک از ضایعات الکتریکی و
الکترونیکی در مقیاس آزمایشگاهی**

مدیریت آموزش، پژوهش و فناوری

خلاصه مدیریتی

مهر ۱۳۹۵

مشاور: معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مدیریت آموزش، پژوهش و فناوری

رشد فناوری در صنایع الکتریکی و الکترونیکی که از سال ۱۹۸۰ میلادی شدت گرفته است، میزان فروش تجهیزات الکترونیکی را به شدت افزایش داده است. عمر مفید این تجهیزات نسبتاً کوتاه بوده و این عمر با توجه به تغییرات سریع فناوری و تغییر دایمی مشخصات فنی قطعات و مجموعه‌ها، به شکل مداوم در حال کاهش است. نتیجه این پدیده، تولید حجم زیادی از ضایعات الکترونیکی است.

ضایعات الکتریکی و الکترونیکی، به مجموعه لوازم و تجهیزات اعم از خانگی، اداری و صنعتی که دارای اجزا و قطعات الکتریکی و یا الکترونیکی بوده و در پایان چرخه عمر خود قرارداشته باشند، (به عبارت دیگر غیرقابل استفاده، شکسته شده یا غیرقابل تعمیر و یا از نظر فناوری از رده خارج باشند)، نظیر تلویزیون، واحد پردازش مرکزی، نمایشگرها (با صفحات تخت و با تیوب اشعه کاتدی)، لپ‌تاپ، چاپگر، اسکنر، گوشی تلفن، ویدیو و امثال این‌ها و مجموعه سیم‌ها، منابع تغذیه و باتری‌های آنان اطلاق می‌شود. این ضایعات و زباله‌ها از دو دیدگاه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند:

اول: این زباله‌ها حاوی مواد بسیار سمی و مضر برای محیط‌زیست و زیست انسانی می‌باشند. ورود این مواد سمی به جریان ضایعات شهری می‌تواند آثار زیانبخشی را بر سلامت انسان و محیط زیست به همراه داشته باشد. مواد سمی خطرناکی نظیر سرب، جیوه و کروم ۶ ظرفیتی در تیوب‌های اشعه کاتدی، بردهای چاپی، خازن‌ها، کلیدهای جیوه‌ای، باتری‌ها، نمایشگرهای کریستال مایع، کارت‌ریج ماشین‌های فتوکپی و درام‌های سلنیومی وجود دارند.

سرب و کادمیم در بردهای مدار چاپی، اکسید سرب و کادمیم در تیوب‌های اشعه کاتدی نمایشگرها، جیوه در نمایشگرهای تخت، کادمیم در باتری‌ها، پلی‌کلرینات بی‌فنیل در خازن‌های قدیمی تر و ترانسفرمرها، برومینات‌ها در مدارهای چاپی و محفظه‌های پوششی پلاستیکی، پلی‌وینیل کلراید در کابل‌ها نمونه دیگر مواد سمی موجود در این زباله‌ها هستند.

دوم: این زباله‌ها حاوی منابع بسیار با ارزش مواد اولیه و استراتژیک می‌باشند. علاوه بر مواد سمی، این ضایعات حاوی مواد با ارزش دیگری (نظیر طلا، پلاتین، پالادیم، نقره، مس و...) بوده که در صورت بازیافت، فرصت‌های اقتصادی مناسبی را فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال تنها در یک گوشی موبایل بیش از ۴۰ ماده ارزشمند وجود دارد که در صورت امکان بازیابی حتی بخشی از آن‌ها ضمن ایجاد ارزش افزوده‌ی اقتصادی، در

مدیریت آموزش، پژوهش و فناوری

سلامت محیط‌زیست نیز تأثیر بسزایی خواهد داشت. یک محاسبه ساده از مهم‌ترین عناصر موجود در دو نمونه از زباله‌های الکترونیک، گوشی موبایل و لپ‌تاپ و مقایسه آن با میزان استخراج و تولید این عناصر از مواد اولیه کانی بیانگر اهمیت بازیافت این زباله‌ها خواهد بود. آمار فروش این دو تجهیز الکترونیک در سال ۲۰۰۷ بیانگر فروش بیش از ۱۲۰۰ میلیون گوشی موبایل و در حدود ۲۵۵ میلیون لپ‌تاپ در سطح جهان می‌باشد. در این میزان تجهیز الکترونیک بیش از ۵۵۰ تن نقره، ۸۵ تن طلا، ۳۱ تن پالادیوم و حدود ۱۴۰ هزار تن مس وجود دارد. این میزان ماده ارزشمند در حدود ۳ درصد حجمی کل تولید طلا و نقره سالانه جهان در همان سال و در حدود ۱۳ درصد حجمی تولید پالادیوم جهان را تشکیل می‌دهد.

بدیهی است مقدار بازیافت مواد در این ضایعات بستگی به عوامل مختلف از جمله اندازه و امکانات سخت افزاری (نوع فناوری) واحد بازیافت مواد دارد و بسته به نوع ضایعات الکترونیکی درصد مواد موجود در آن‌ها متغیر است. در شرایط فعلی، آمار تولید ضایعات این محصولات در کشورهای مختلف، به شکل واقعی یا در دسترس نیست و یا در حد ضعیف وجود دارد. با استفاده از فنون آماری، تولید ضایعات الکترونیک در ۲۷ کشور عضو اتحادیه اروپا، حدود $۹/۱ - ۸/۳$ میلیون تن در سال و در سطح جهانی حدود ۴۰ میلیون تن برآورد شده است. با توجه به توسعه حجم این زباله‌ها در آینده و با عنایت به اهمیت دو دیدگاه بالا، فرایند بازیافت این زباله‌ها از جذابیت بالایی برخوردار خواهد بود.

زنجیره بازیافت زباله‌های الکترونیک شامل سه بخش اصلی است. مرحله اول شامل جمع‌آوری زباله‌های مذکور و تامین خوراک فرایند بازیافت می‌شود. در بسیاری از کشورها قوانین مشخصی در خصوص نحوه جمع‌آوری و دفع زباله‌های مذکور وجود نداشته و لذا الزامی به تحویل آن به مکان‌ها یا نهادهای مشخص و امحای علمی آن وجود ندارد. از سوی دیگر بخش بزرگی از کالاهای فوق به نوعی در چرخه خرید و فروش در بازارهای ثانویه قرار می‌گیرند و با نگاهی سرمایه‌ای تا مدت‌ها در پایان چرخه عمر خود قرار نمی‌گیرند. بدین ترتیب در غیاب برنامه‌ای مدون و قوانین حاکمیتی در خصوص تشویق و یا الزام به تحویل زباله‌های مذکور به مکان‌ها و یا نهادهای مشخص، مرحله جمع‌آوری زباله‌های مذکور بسیار چالش برانگیز خواهد بود. در این راستا در کشورهای مختلف روش‌های متعددی را بر پایه تصویب قوانین و استانداردهای زیست محیطی همراه با اجرای برنامه‌های تشویقی جهت تمرکز و ساماندهی مرحله جمع‌آوری روی آورده‌اند. در این برنامه‌ها علاوه بر آموزش شهروندان در خصوص نحوه دفع زباله‌های الکترونیک با اعمال عوارضی بر خرید محصولات

مدیریت آموزش، پژوهش و فناوری

الکترونیک نسبت به تأمین هزینه‌های بازیافت اقدام می‌کنند. در همین راستا با اعمال ^۱EPR، افزایش مسئولیت تولید کنندگان، آن‌ها را ملزم به ارائه برنامه‌ای برای جمع‌آوری محصولات الکترونیک خود در پایان چرخه عمرشان می‌نمایند.

مرحله دوم چرخه بازیافت به دسته‌بندی، دمونتاژ و جداسازی اجزا محصولات الکترونیکی، خریداش، و جداسازی مکانیکی اختصاص دارد که **مرحله بازیافت مقدماتی** نامیده می‌شود. در این مرحله ابتدا محصولات بر اساس محتوای مواد آن از منظر ارزشمندی و همچنین خطرناک بودن و مضر بودن برای محیط زیست دسته بندی شده و بر همین اساس در فرایندهای خاص خود دمونتاژ و جداسازی و برای مرحله نهایی آماده می‌شوند. از نمونه مواد خطرناک در این مرحله گازهای خنک ساز کمپرسورهای یخچال و همچنین فلزات سنگین حاضر در باتری‌ها و پوشش لامپ‌های تلویزیون‌ها و مانیتورهای (CRT) است که می‌بایست پیش از عملیات خریداش و یا جداسازی جدا شده و به طور امن بازیافت شوند. در خصوص سایر مواد موجود در زباله‌ها با فرایند خریداش ابتدایی و استفاده از روش‌هایی چون ارتعاش، نیروی مغناطیسی، جریان گردابی (Eddy Current) و اختلاف وزن مخصوص سعی در جدایش حداکثری اجزای پلاستیکی و پلیمری، فلزی آهنی و غیر آهنی و شیشه می‌شود. با این عمل فرایند جداسازی عناصر در مرحله نهایی ساده‌تر و علاوه بر این از خطرات آن کاسته می‌شود. از مهم‌ترین مشکلات مرحله نهایی بازیافت، تولید و انتشار گازهای مضر برای محیط‌زیست و زیست انسانی است که به دلیل وجود موادی همچون فلزات سنگین و یا مواد پلیمری همچون بازدارنده شعله‌وری (Flame retardant) در زباله‌ها و سوختن، تبخیر و یا واکنش آن‌ها با مواد دیگر تولید و منتشر می‌شوند. حذف و جداسازی موادی از این قبیل در مرحله مقدماتی موجب ایمن شدن و افزایش بازدهی فرایند مرحله‌ی نهایی می‌شود.

مرحله سوم یا مرحله نهایی بازیافت مبتنی بر دانش موجود از فرایند استخراج فلزات از مواد اولیه معدنی است و به طور کلی شامل دو روش پیرومتالورژی و هیدرومتالورژی می‌شود. روش پیرومتالورژی مبتنی بر استفاده از انرژی حرارتی در احیا و جداسازی عناصر مختلف از یکدیگر در شرایط مذاب و یا بخار می‌باشد. در روش هیدرومتالورژی از ویژگی قابلیت انحلال عناصر مختلف در محلول‌های متفاوت و اختلاف در حلالیت و یا واکنش‌دهی آن‌ها در محیط مایع استفاده شده و عناصر از یکدیگر جداسازی می‌شوند. استحصال عناصر مختلف

^۱ - Extended producers responsibility

مدیریت آموزش، پژوهش و فناوری

و با ارزش از زباله‌های الکترونیک می‌تواند از هر یک از دو روش و یا ترکیبی از آن‌ها صورت گیرد. جهت تغلیط و خالص‌سازی عناصر به‌دست آمده از فرآیندهای تکمیلی دیگری چون الکترومالتورژی نیز استفاده خواهد شد. از جمله محدودیت‌های روش پیرومالتورژی می‌توان به عدم امکان بازیافت پلاستیک، دشواری بازیافت آهن و آلومینیوم، انتشار گازهای خطرناک از قبیل دیوکسین‌ها، نیاز به سرمایه‌گذاری بالا برای نصب و تجهیز کارخانه‌ها برای دستیابی به بالاترین نرخ بازیافت و حفاظت شدید از محیط‌زیست و بازیافت ناقص فلزات گرانبها اشاره کرد. در مقابل معضلات روش هیدرومالتورژی نیز شامل سرعت پایین روش‌های هیدرومالتورژی که بازیافت اقتصادی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، استفاده از مواد خطرناک مانند سیانید که می‌تواند موجبات آلودگی آب و خاک شود و هزینه‌های بالای تجهیزات و بازدهی پایین در استحصال برخی عناصر و یا در برخی از روش‌های هیدرومالتورژی است.

بازیافت زباله‌های الکترونیک در مقیاس صنعتی در شرکت‌های معدودی در کشورهای سوئیس، سوئد، آمریکا، بلژیک، کانادا و فنلاند توسعه یافته است و با توجه به محتوای زباله‌ها، از ترکیبی از فرایندهای مقدماتی و تکمیلی فوق شکل گرفته است. با گسترش توجه به پدیده زباله‌های الکترونیک در کشورهای مختلف و تصویب الزامات و قوانین حفاظتی و حمایتی و همچنین با توجه به محدودیت منابع و انرژی در سطح جهان بازار تکنولوژی بازیافت گسترش بیشتری می‌یابد. همچنین گسترش پیمان‌های بین‌المللی در این حوزه و تقویت الزامات قانونی در سطح جهان، کشورهای در حال توسعه را به سوی اتخاذ تدابیری برای بازیافت زباله‌های الکترونیکی خود هدایت می‌نماید. در همین راستا حمایت‌های سازمان‌های بین‌المللی نیز مشوقی برای تسریع در شکل‌گیری سایت‌های بومی بازیافت در این کشورها می‌باشد. با این وجود در ایران نه در حوزه فناوری بازیافت و نه در حوزه الزامات قانونی فعالیت زیادی صورت پذیرفته است. با توجه به رشد استفاده از محصولات الکترونیک در ایران طی دهه اخیر و توسعه آن در آینده نزدیک توجه بیش‌ازپیش سازمان‌های مسئول دولتی ضروری می‌باشد.

پروژه حاضر تلاش می‌کند تا با مطالعه مبانی و فعالیت‌های صورت گرفته در سطح بین‌المللی در حوزه بازیافت زباله‌های الکترونیکی و الکترونیک، نسبت به طراحی فرایندی بهینه با هدف بازیافت زباله‌های پر ارزش الکترونیکی با تمرکز بر بردهای موبایل و کامپیوتر اقدام کند. در این راستا با فراهم آوردن مقدمات مطالعات اولیه و

مدیریت آموزش، پژوهش و فناوری

آزمایشگاهی جهت دستیابی به دانش فنی فناوری بازیافت زباله‌های الکترونیکی مذکور و حصول نتایج اطمینان بخش در مقیاس آزمایشگاهی، مقدمه طراحی خط پایلوت و نیمه صنعتی استحصال مواد ارزشمند از این زباله‌ها فراهم گردیده است.

بر اساس نتایج به دست آمده، طی فرایند بازیافت زباله‌های الکترونیکی در پروژه حاضر میزان زباله جمع‌آوری شده شامل ۱۰۸ دستگاه کیس کامپیوتر و ۲۵ دستگاه مانیتور و مقادیر دیگری زباله‌های متفرقه از جمله اسیلوسکوپ، گوشی موبایل و یا ضایعات الکتریکی بوده است.

در فرایند جداسازی برای حصول دقت و ارزیابی محتوای فلزات گرانبه‌های هر بخش از اجزای کامپیوتر سعی بر جداسازی این اجزا از روی بردها شده است.

در این مرحله کلیه چیپ‌ها که عمدتاً شامل "آی سی های" مختلف موجود روی "مادر برد" و یا سایر بردها می شود، جدا شده و با استفاده از آسیاب مولینکس و بال میل پودر شدند (حدود ابعادی ۷۵ میکرون). این میزان برای هر کیس در حدود ۱۵۰ گرم تا ۲۰۰ گرم می شود. به علاوه بردهای مدار چاپی خالی نیز که خرد و تا حدودی آسیاب شدند (این بخش‌ها به دلیل وجود مواد پلیمری کمتر آسیاب می شوند و نیاز به روش‌های ویژه‌ای برای آسیاب دارند) در حدود ۵۰۰ تا ۸۰۰ گرم در هر کیس را شامل می شوند.

محتوای پودر چیپ در اولین آنالیز حدود ppm ۲۵۰ طلا و در حدود ppm ۱۳۰۰ نقره نشان داده است. این میزان برای بردها حدود ppm ۴۵ طلا و ppm ۱۱۰۰ نقره بود (این آمار بر اساس نتایج متوسط آنالیزهای متعدد انجام گرفته روی انواع قطعات با برندهای مختلف می باشد که به تفصیل در گزارش جامع طرح ارایه شده است).

از آنجاکه روش‌های به کار گرفته شده در این فرایند عمدتاً بر فرایندهای هیدرومتالورژی متمرکز است و نسبت محلولی بالایی برای جدا نمودن عناصر در مراحل مختلف نیاز است، (از ۱ به ۲۰ تا ۱ به ۴۰) در آزمایش‌های مختلف و روش‌های متفاوت ورودی مواد از ۱۵ گرم تا ۵۰ گرم متفاوت بوده است.

در پایان فرایند، حدود ppm ۳۳ طلا جداسازی شد. همچنین در تغییرات نسبت‌های مختلف این مقدار تا حداکثر ppm ۴۵ افزایش یافت. بنابراین با روش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پروژه و در این مقیاس بازدهی بازیافت عناصر بالا نبود. قابل ذکر است، طی آنالیز مراحل مختلف مشخص شد که بخش عمده‌ای از هدر روی عنصر طلا در مرحله جداسازی مس اولیه می باشد که از این مرحله به بعد بیش از ۸۰ درصد طلا بازیابی شده است.

مدیریت آموزش، پژوهش و فناوری

به طور کلی در این روش، با توجه به تنوع منابع می توان تا حدود ۷۰ درصد بازدهی را پیش بینی کرد. بر این اساس با فرآوری هر کیلو چیپ می توان حدود ۱۷۵ میلی گرم طلا و برای بردهای کامپیوتری تا حدود ۲۸ الی ۳۰ میلی گرم طلا را استحصال کرد.