زباله‌های تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی
یک منبع با ارزش جهت بازیافت

حامد دارابی، سهیلا یغمایی*

تهران، دانشگاه صنعتی‌شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پیام‌نگار: **yaghmaei@sharif. edu**

چکیده

رشد و توسعه تولید تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی از یک‌سو و عمر مفید کوتاه این تجهیزات از سوی دیگر باعث به‌وجود آمدن حجم بزرگی از زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی شده است. هر چند روش‌های عمومی نظیر دفع و سوزاندن برای رهایی از این زباله‌ها وجود دارد، اما این روش‌ها دارای معایبی از هر دو دیدگاه اقتصادی و زیست‌محیطی هستند. زباله‌های الکترونیکی از منظر مواد و ترکیبات تشکیل‌دهنده، بسیار متنوع و پیچیده‌اند و آمار و ارقام منتشر شده توسط سازمان‌های مختلف حکایت از حجم زیاد این ضایعات دارد. به همین جهت برای بازیافت مؤثر این زباله‌ها، به یک مدیریت کارآمد، زیرساخت مناسب و برنامه منسجم نیاز می‌باشد. امروزه بسیاری از کشورها و سازمان‌ها قوانینی در جهت استفاده مجدد، بازیافت و سایر اشکال بازیابی این ضایعات به‌منظور کاهش انهدام و دفع آنها به اجرا گذاشته‌اند. خوشبختانه اخیراً اقدامات مؤثری در این زمینه در کشور ما ایران صورت گرفته است.

در این بررسی، کوشش شده است به‌طور مختصر زباله‌های الکترونیکی از ابعاد مختلف نظیر مقدار و ترکیب زباله‌های الکترونیکی، فواید بازیافت، مراحل کلی فرایند بازیافت، مدیریت ضایعات از ابعاد مختلف نظیر جمع‌آوری ضایعات و آلودگی‌های زیست‌محیطی مرتبط با زباله‌های الکترونیکی و اقداماتی که در کشور ما ایران صورت گرفته است، بررسی گردد.

کلمات کلیدی: زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی، بازیافت، آلودگی

Archive of SID

۱- مقدمه

تولید تجهیزات الکتریکی‌والکترونیکی[1] (EEE) به‌طور وسیعی در حال افزایش است، اما عمر مفید این تجهیزات با توجه به سیاست‌های اقتصادی شرکت‌های تولیدکننده و در نتیجه تغییرات سریع در کیفیت مواد سازندهٔ آنها، در حال کاهش می‌باشد. این مسئله باعث شتاب بخشیدن به افزایش زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی گردیده است. امروزه موضوع زباله‌های الکترونیکی توجه بسیاری از سازمان‌ها و کشورها را به خود جلب کرده است. این موضوع از دو دیدگاه حائز اهمیت است. دیدگاه نخست، مسئله آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مواد خطرناک و سمی موجود دراین زباله‌هاست. دیدگاه دوم، موضوع بازیابی فلزات گرانبها و دیگر مواد ارزشمند موجود در زباله‌های الکترونیکی است؛ با استفاده مجدد از این مواد بازیافتی در مصرف انرژی و مواد خام صرفه‌جویی می‌شود و درآمدهای زیادی نصیب بازیافت کنندگان می‌گردد. با در نظر گرفتن این مسائل، بازیافت زباله‌های الکترونیکی می‌تواند اهمیت به سزایی داشته باشد. بنابراین بایستی در این زمینه با یک مدیریت مناسب و برنامه کارامد، فعالیت شود. عوامل متعددی در طراحی یک راهکار مؤثر و

1. EEE: Electric and Electronic Equipment

www.SID.ir

مطلوب برای مدیریت زباله‌های الکترونیکی تأثیرگذار هستند. این راهکارها باید از نظر اقتصادی پایدار، امکان‌سنجی شده و از حمایت اجتماعی برخوردار باشند. این مطلب بدان معنی است که اجرای یک فرایند بازیافت مؤثر، نیازمند به‌کارگیری فناوری‌های مختلف و مشارکت گسترده سازمان‌های ذیربط می‌باشد.

۲- مقدار و نوع زباله‌های الکترونیکی

هر ساله میلیون‌ها تن زباله الکتریکی و الکترونیکی حاصل از تجهیزات مختلف نظیر کامپیوترهای کهنه، بُردهای مدارهای الکتریکی، تلویزیون، چاپگر و تلفن‌های همراه و دیگر تجهیزات الکترونیکی در سراسر دنیا تولید می‌گردد. به‌طور کلی میزان بازیابی این ضایعات، براساس نوع محصول، متفاوت است، به‌عنوان مثال در یک بررسی صورت گرفته در سال ۲۰۰۷ میلادی در ایالات متحده امریکا، میزان دورریز و بازیافت انواع مختلف ضایعات الکترونیکی مورد بررسی قرار گرفته که در جدول (۱) نشان داده شده است.

در غرب اروپا ۶ میلیون تن ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی در سال ۱۹۹۸ ایجاد شده است. انتظار می‌رود که این میزان حداقل ۳ تا ۵ درصد در سال افزایش یابد[۲]. در سویس سالانه حدود ۱۱۰۰۰۰ تن تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی از رده خارج میشود، این مقدار در آلمان ۱۰ برابر بیشتر است و به ۱/۵ میلیون تن می‌رسد[۳]. در یک بررسی صورت گرفته در ایالات متحده امریکا نشان داده شده است که در سال ۲۰۰۴ میلادی بیش از ۳۱۵ میلیون کامپیوتر به زباله تبدیل شده است[۴]. برآوردها حاکی از سهم ۴ میلیونی ایران از تولید ۲۰ تا ۵۰ میلیون تن زباله الکترونیکی در دنیا است. هم اکنون حدود ۴ میلیون کامپیوتر و حدود ۱۸ میلیون تلویزیون از رده خارج در کشور ما موجود است. یکی از تجهیزاتی که سهم زیادی در تولید ضایعات الکترونیکی دارد تلفن‌های همراه است.

کشور ما ایران در زمینه تعویض تلفن همراه، پیشتاز است. طبق گفته مدیر کل صنایع برق، الکترونیک و فناوری اطلاعات وزارت صنایع و معادن، افراد در اروپا هر ۱۸ ماه یکبار گوشی‌های تلفن همراه خود را عوض می‌کنند در حالی که در ایران هر ۱۵ ماه یکبار این کار صورت می‌گیرد[۵].

۳- تعیین مشخصات ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی (WEEE)

ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی از نظر مواد و ترکیبات، ناهمگن و پیچیده است و به‌منظور اجرای یک برنامه بازیافت مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست، شناسایی نوع و میزان مواد گرانبها و نیز مواد خطرناک موجود در این ضایعات مهم و ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین باید از خصوصیات و ویژگی‌های این ضایعات آگاهی کافی حاصل شود.

جدول ۱- میزان دورریز و بازیافت ضایعات الکترونیکی در سال ۲۰۰۷ میلادی در ایالات متحده امریکا[۱]

نوع محصول	میزان کل دفع شده** (برحسب میلیون واحد)	میزان دورریز (برحسب میلیون واحد)	میزان بازیافت (برحسب میلیون واحد)	درصد بازیافت (درصد وزنی)
تلویزیون	۲۶/۹	۲۰/۶	۶/۳	٪۱۸
محصولات کامپیوتری*	۲۰۵/۵	۱۵۷/۳	۴۸/۲	٪۱۸
تلفن همراه	۱۴۰/۳	۱۲۶/۳	۱۴	٪۱۰

* محصولات کامپیوتری شامل CPU، مانیتور، نوت بوک، صفحه کلید، ماوس، چاپگر، فکس،... می‌باشند.

** این میزان شامل تجهیزاتی نمی‌شود که علیرغم عدم استفاده، در انبارها نگهداری می‌شوند.

Archive of SID
www.SID.ir

۳-۱ ترکیب موادواجزای سازنده

ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی شامل تعداد زیادی از مواد گوناگون فلزی و غیر فلزی با ترکیب درصدهای مختلف است. اتحادیه سازندگان پلاستیک در اروپا[1] (APME) جدولی از میزان مواد موجود در ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی موجود در غرب اروپا در سال ۱۹۹۵ منتشر کرده است[۶]. به‌طور کلی برد مدارهای الکتریکی که در اکثر تجهیزات الکتریکی وجود دارد تقریباً شامل ۴۰٪ فلز، ۳۰٪ پلاستیک و ۳۰٪ سرامیک می‌باشد [۸و۷].

جدول ۲- مواداصلی یافت شده در تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی[۶]

مواد	درصد
آهنی	۳۸
غیرآهنی	۲۸
پلاستیک	۱۹
شیشه	۴
چوب	۱
دیگر موارد	۱۰

آمار و نتایج حاصل از برنامه‌های محلی جمع‌آوری ضایعات الکترونیکی خانگی در ایالات متحده امریکا نشان می‌دهد که اکثر وسایل جمع‌آوری شده شامل تلویزیون و کامپیوتر و مانیتور و دیگر وسایل می‌باشد. فلزات ۴۹٪ وزنی، پلاستیک‌ها ۳۳٪ و لوله‌های اشعه کاتدی[2] CRT، ۱۲٪ وزنی بیش از ۹۰٪ ضایعات الکترونیکی جمع‌آوری شده را تشکیل می‌دهند[۱۴]. شایان ذکر است که لوله اشعه کاتدی در تلویزیون‌ها و صفحات نمایش (مانیتور) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تقسیم‌بندی را در شکل (۱) نیز مشاهده می‌کنیم.

۳-۲ ویژگی‌های مغناطیسی، چگالی و هدایت الکتریکی

از میان خواص مواد به‌کار رفته در ساخت تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی، خاصیت مغناطیسی، چگالی و هدایت الکتریکی نقش بسیار مهم و تأثیرگذاری در فرایند بازیافت ایفا می‌کنند، زیرا بسیاری از اصول و روش‌های جداسازی مواد موجود در این تجهیزات بر پایه تفاوت در همین ۳ ویژگی ذکر شده است. از این رو در جدول (۳) مقادیر مربوط به چگالی و هدایت الکتریکی پاره‌ای از فلزات به‌کار رفته در ساخت تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی (EEE) به‌منظور مقایسه آورده شده است[۷].

شکل ۱- توزیع مواد در زباله‌های الکترونیکی خانگی جمع‌آوری شده در ایالات متحده امریکا [۱۴]

جدول ۳- مقادیر چگالی و هدایت الکتریکی فلزات استفاده شده در تجهیزات الکتریکی والکترونیکی EEE [۷]

مواد	چگالی ($\times 10^3$ kg. m^{-3})	رسانایی الکتریکی ($\times 10^3 \Omega^{-1}$. m^{-3})
مس	۸/۹۳	۵۹
(مس- روی)	۸/۴	۱/۹
آلومینیم	۲/۷	۳۵
منگنز	۱/۷۴	۲۳
نقره	۱۰/۴۹	۶۸
روی	۶/۹۲	۱۷/۴
طلا	۱۹/۳۲	۴۱
برنج (بدون آهن)	۸/۴۰	۱۵-۲۶
نیکل	۸/۹	۱۲/۵
قلع	۷/۲۹	۸/۸
سرب	۱۱/۳۴	۵
آلیاژ فولاد	۷/۷	۰/۷

۳-۳ اندازه ذره و شکل

اندازهٔ ذرهٔ و شکل ذرات نیز نقش بسیار مهمی در فرایند بازیافت مکانیکی ایفا می‌کند. تقریباً همه فرایندهای بازیافت مکانیکی، در

1. APME: Association of Plastic Manufactures in Europe
2. CRT: Cathode Ray Tube

Archive of SID
www.SID.ir

یک محدودهٔ اندازه مؤثر خاص ذرات دارای بیشترین بازدهی و بهترین عملکرد می‌باشند. به‌طور کلی هرچه ذرات تشکیل‌دهنده یک قطعه الکترونیکی که قرار است بازیافت گردد، بیشتر خرد گردند و ریزتر شوند، درصد میزان جداسازی مواد موجود در قطعه الکترونیکی افزایش می‌یابد. مطالعات صورت گرفته روی مشخصات ضایعات کامپیوترهای شخصی (PC)[1] و برد مدارهای چاپی الکترونیکی (PCB)[2] نشان داده است که بعد از خردکردن ثانویه توسط یک خردکن چکشی، فلزات اصلی موجود در یک قطعه برد مدار الکترونیکی (PCB) به ضخامت ۵ میلیمتر به میزان بسیار زیادی جدا می‌شوند[۷]. همچنین آزمایش‌های انجام شده در مقیاس صنعتی نشان داده است که بعد از ۲ مرحله خردکردن، میزان جداسازی فلزات موجود در یک برد مدار الکترونیکی به ضخامت ۵ میلیمتر، بین ۹۶/۵ و ۹۹/۵ درصد رسیده است.

۴- بازیافت اقدامی در جهت کاهش مصرف انرژی و مواد خام

تجهیزات الکترونیکی از قطعات مختلفی تشکیل شده‌اند که خود حاصل ترکیب مواد و ترکیبات مختلف هستند. از این رو با استفاده مجدد از قطعات قابل استفاده و نیز بازیابی مواد فلزی و غیرفلزی موجود در آنها می‌توان در مصرف انرژی و مواد خام صرفه‌جویی کرد. سازمان حفاظت محیط زیست امریکا جدولی از میزان صرفه جویی در مصرف انرژی با به‌کارگیری مواد بازیافتی در مقابل مواد خام ارائه کرده است[۹]:

جدول ۴- میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی با به‌کارگیری مواد بازیافتی[۹]

ماده بازیافتی	صرفه‌جویی در مصرف انرژی٪
آلومینیم	۹۵
مس	۸۵
آهن و فولاد	۷۴
سرب	۶۵
روی	۶۰
کاغذ	۶۴
پلاستیک	> ۸۰

1. PC: Personal Computer
2. PCB: Printed Circuit Board

سازمان حفاظت محیط زیست امریکا هفت مزیت استفاده از آهن و فولاد مستعمل را بجای استفاده از مواد خام آنها شناسایی کرده که در جدول (۵) نشان داده شده است:

جدول ۵- مزایای استفاده از آهن و فولاد مستعمل[۹]

مزایا	درصد
صرفه‌جویی در انرژی	۷۴
صرفه‌جویی در استفاده از مواد خام	۹۰
کاهش آلودگی هوا	۸۶
کاهش مصرف آب	۴۰
کاهش آلودگی آب	۷۶
کاهش زباله‌های معدنی	۹۷
کاهش زباله‌های تولیدی مصرف کنندگان	۱۰۵

بر طبق مطالعات انجمن سازندگان پلاستیک در اروپا، انرژی مورد نیاز برای بازیابی مس از ضایعات الکترونیکی، یک ششم میزان انرژی مورد نیاز برای استحصال مس از سنگ معدن آن می‌باشد[۱۰]. زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی حاوی مقدار زیادی پلاستیک هستند که با بازیافت مواد پلاستیکی موجود در آنها، هم می‌توان از پلاستیک‌های بازیافت شده در ساخت مواد پلاستیکی جدید بهره گرفت و هم می‌توان از آن‌ها به‌عنوان سوخت استفاده کرد؛ این عمل "بازیافت گرمایی" نامیده می‌شود. برای مثال ۱ تن پلاستیک می‌تواند جایگزین ۱/۳ تن زغال‌سنگ در کوره‌های سیمان شود[۱۱]. انجمن سازندگان پلاستیک در اروپا بازیافت گرمایی را بهترین گزینه از لحاظ محیط زیست برای مدیریت پلاستیک‌های ضایعات الکترونیکی در اروپا می‌داند[۱۲]. در سال ۲۰۰۲، سوئیس و دانمارک حدود ۷۰٪ وزنی کل زباله‌های پلاستیکی خود را به طریق گرمایی بازیافت کردند[۱۳]. در ایالات متحده امریکا، پلاستیک‌های بازیافتی از لوازم الکترونیکی به‌طور عمده در الوارهای پلاستیکی، مبلمان شهری و مواد مورد نیاز در صنعت جاده‌سازی به کار می‌روند.

Archive of SID

www.SID.ir

۵- مدیریت ضایعات الکترونیکی

عوامل متعددی در طراحی یک راهکار مؤثر و مطلوب برای مدیریت ضایعات الکترونیکی تأثیرگذار هستند. این راهکارها باید از نظر اقتصادی، پایدار و امکان سنجی شده و نیز از حمایت اجتماعی برخوردار باشند. در حال حاضر موضوع بازیافت ضایعات الکترونیکی پدیده ای نوظهور در کشور ما ایران است و هنوز یک زیرساخت منسجم و مطلوب به‌طور کامل وجود ندارد. البته به تازگی گامهای مؤثری در این زمینه برداشته شده است، اما هنوز در آغاز کار هستیم. در این زمینه می‌توان از تجربیات دیگر کشورها نظیر ایالات متحده امریکاو نیز کشورهای اروپایی که تجربیات و فعالیت‌های گسترده ای در زمینه بازیافت ضایعات دارند و آمار و ارقام بسیاری در زمینه بازیافت ضایعات الکترونیکی منتشر کرده اند استفاده کرد. سازمان بین‌المللی بازیافت تجهیزات الکترونیکی (IAER)[1] اعلام کرده است که در سال ۲۰۰۳ میلادی حدود ۷۰۰۰ کارمند در امریکا در این صنعت مشغول بکار بوده و درآمدی بیش از ۷۰۰ میلیون دلار امریکا نصیب این کشور شده است[۱۴]. همانطور که قبلا هم ذکر شد محصولات الکترونیکی شامل مواد و ترکیبات متعدد بوده و از ادغام فن آوری‌های مدرن و متعدد حاصل شده اند. این بدان معنی است که برای بازیافت مؤثر، بسیاری از بخش ها، سازمان‌ها و فناوری‌ها باید مشارکت داشته باشند. به همین جهت ایجاد زیرساخت مناسب برای اجرای موفق فرایند بازیافت زباله‌های الکترونیکی ضروری به نظر میرسد. یک زیر ساخت مناسب بایستی روش‌های فرایندی مورد نیاز، حجم مواد و تجهیزاتی که باید مورد پردازش و بازیافت قرار گیرند، روشهای جمع‌آوری و حمل و نقل ضایعات و نیز فناوری‌های مورد استفاده به‌منظور بازیابی مواد گرانبها و همچنین روش‌های حذف مواد سمی و خطرناک را شامل شود.

۶- تبلیغات برای بازیافت

به‌منظور بازیافت مؤثر زباله‌های الکترونیکی، مصرف کنندگان باید بدانند لوازم الکترونیکی از رده خارج شده یا غیر قابل استفاده خود را کجا ببرند. بسته به شرایط هر منطقه باید از شیوه‌های مناسب برای تبلیغات بهره برد. برای مثال شیوه‌های تبلیغات در نواحی تجاری با نواحی مسکونی متفاوت است. در یک منطقه تجاری بهتر است از آگهی در روزنامه استفاده شود و یا در یک دانشگاه یا شرکت بزرگ استفاده از ایمیل تبلیغاتی روش مؤثرتری خواهد بود. در یک منطقه مسکونی نیز توزیع برگه‌های تبلیغاتی می‌تواند روش مؤثری باشد.

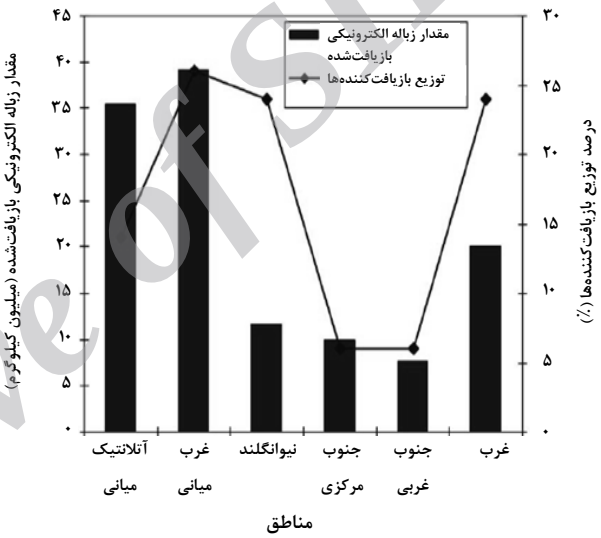
۷- جمع‌آوری ضایعات الکترونیکی

محل جمع‌آوری ضایعات جامد شهری می‌تواند برای جمع‌آوری ضایعات الکترونیکی نیز مورد استفاده قرار گیرد که در نتیجه بخشی از هزینه‌ها حذف می‌گردد. این شیوه یکی از روش‌های مؤثر از نظر اقتصادی است. از دیدگاه دیگر، خرده فروش‌های محصولات الکترونیکی می‌توانند به‌عنوان دفتر جمع‌آوری ضایعات الکترونیکی در نظر گرفته شوند و مصرف‌کنندگان تجهیزات الکترونیکی می‌توانند این ضایعات را به خرده فروش‌ها تحویل دهند. یعنی مثلاً به هنگام خریداری وسیله الکترونیکی جدید، وسیله مستعمل قبلی را تحویل دهند. در همین راستا چندین تولیدکننده تجهیزات اصلی و ضروری الکتریکی اقدام به دایر کردن سیستم‌های جمع‌آوری برای گردآوری ضایعات الکترونیکی کرده اند. HP، DELL و IBM بدون توجه به اینکه سازنده اصلی وسایل الکترونیکی چه شرکتی بوده باشد، اقدام به جمع‌آوری تجهیزات مستعمل در برخی از کشورها می‌کنند [۱۵]. در کشور ما ایران، سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری مشهد از اردیبهشت ماه ۱۳۸۸ طرحی را به اجرا گذاشته که به موجب آن محل معینی در خیابان سعدی مشهد برای تحویل تجهیزات الکترونیکی و الکتریکی مستعمل اختصاص داده شده است؛ و هموطنان ما در مشهد می‌توانند با مراجعه به این مرکز تجهیزات مستعمل خود را تحویل دهند. در مرحله بعد کارشناسان این سازمان، قطعات قابل استفاده مجدد تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی را جدا و تفکیک می‌نمایند و در صورت نیاز می‌توان از این قطعات دوباره استفاده کرد[۱۶]. در ایالات متحده امریکا نیز معمولاً شهرداری‌ها نقش اصلی را در ارائه برنامه‌های بازیافت و جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی ایفا می‌کنند. مطابق با آمار منتشر شده، در بین سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۱ میلادی تقریبا ۵۰۰ برنامه جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی به اجرا درآمده است. این برنامه‌ها در ۳۰ ایالت از ۵۰ ایالت امریکا اجرا شده است. بیشتراین برنامه‌ها در ایالتهای ماساچوست، ایلینویز، نیویورک، مینسوتا کالیفرنیا، نیوجرسی، کارولینای شمالی و میشیگان به اجرا درآمده است. هدف بیشتر این برنامه‌ها جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی از مناطق

1. IAER: International Association of Electronics Recyclers

Archive of SID
www.SID.ir

مسکونی بوده و تعداد زیادی از آن‌ها به مدت ۳۶ ماه یا کمتر در حال اجرا بوده‌اند[۱۷]. شکل (۲) توزیع شرکت‌های بازیافت و میزان تجهیزات الکترونیکی بازیافت شده در امریکا را براساس منطقه‌های جغرافیایی نشان می‌دهد. این نمودار بازتابی از وجود عملیات بازیافت در هر منطقه است. همانطور که در شکل نیز مشخص است شرکت‌های بازیافت در مناطق غرب میانی[1]، نیوانگلند[2] و غرب[3] متمرکز شده‌اند که در هر یک تقریباً یک چهارم شرکت‌های بازیافت موجود می‌باشند. همچنین مشخص است که مناطق غرب میانی و آتلانتیک‌میانی[4] بالاترین سطح فعالیت بازیافتی را دارند و پس از آن‌ها منطقه‌غرب قرار دارد [۱۴].



شکل ۲- توزیع بازیافت‌کننده‌ها و میزان تجهیزات الکترونیکی بازیافت‌شده در امریکا براساس مناطق جغرافیایی[۱۴]

۸- مراحل کلی فرایند بازیافت ضایعات

۸-۱ جمع‌آوری ضایعات

اولین مرحله از فرایند کلی بازیافت، جمع‌آوری ضایعات است. همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، ضایعات الکترونیکی یا از طریق شرکت‌های خصوصی و یا توسط سازمان‌های دولتی نظیر شهرداری‌ها و سازمان‌های بازیافت جمع‌آوری می‌شوند.

۸-۲ ارزیابی و دسته‌بندی

در مرحله دوم، ضایعات جمع‌آوری شده به واحد ویژه‌ای منتقل می‌شوند. در این واحد کارشناسان، تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی جمع‌آوری شده را توسط آزمایشات مختلف مورد ارزیابی قرار داده، آزمون کرده و انواع مختلف تجهیزات را دسته‌بندی می‌کنند. در این مرحله تجهیزاتی که امکان استفاده مجدد از آن‌ها وجود دارد جدا شده و دوباره به فروش می‌رسند. به‌طور مثال اگر در میان زباله‌های الکترونیکی جمع‌آوری شده دستگاههایی نظیر کامپیوترهای شخصی مشاهده شود که امکان استفاده مجدد از آن‌ها وجود دارد می‌توان این تجهیزات را در اختیار مدارس و سایر موسساتی که به این وسایل نیاز دارند قرار داد.

۸-۳ پیاده‌سازی

در این مرحله کارشناسان، تجهیزات غیر قابل استفاده را پیاده کرده و قطعات سازنده آن را از هم جدا می‌کنند. در این مرحله نیز به کمک آزمایش‌های متعدد، از میان قطعات جداشده، قطعاتی را که امکان استفاده دوباره و فروش مجدد آن‌ها وجود دارد از سایر قطعات جدا می‌کنند. مثلا در مورد وسیله‌ای نظیر کامپیوتر شخصی پس از جداسازی قطعات تشکیل‌دهنده آن، از قطعاتی نظیر CPU و مودم و برخی دیگر در صورتی که امکان استفاده دوباره از آنها وجود داشته باشد، می‌توان در صورت نیاز، در صنعت تعمیر کامپیوتراستفاده کرد. در این مرحله همچنین قطعاتی نظیر لوله‌های اشعه کاتدی که به فرایند بازیافت ویژه‌ای نیاز دارند از سایر قطعات الکترونیکی جدا می‌شوند، شایان ذکر است که لوله‌های اشعه کاتدی یکی از بزرگ-ترین منابع سرب در زباله‌های جامد شهری به‌حساب می‌آیند و به‌دلیل خطراتی که سرب برای محیط‌زیست دارد، بایستی در بازیافت آن‌ها مسائل ایمنی بدقت رعایت گردد.

۸-۴ کاهش‌اندازه

در مرحله کاهش اندازه، بااستفاده از دستگاه‌های خردکن مخصوص، قطعات تفکیک شده حاصل از مرحله قبل، تکه‌تکه و خردشده و تا ابعاد مورد نظر ریز می‌شوند. زیرا همان‌طور که قبلا هم ذکر گردید بسیاری از فرایندهای بازیافت در یک محدودهٔ خاص ابعاد، ذرات دارای بازدهی بالای جداسازی هستند.

1. Midwest
2. New England
3. West
4. Mid-Atlantic

Archive of SID
www.SID.ir

۸-۵ جداسازی بر حسب نوع ماده

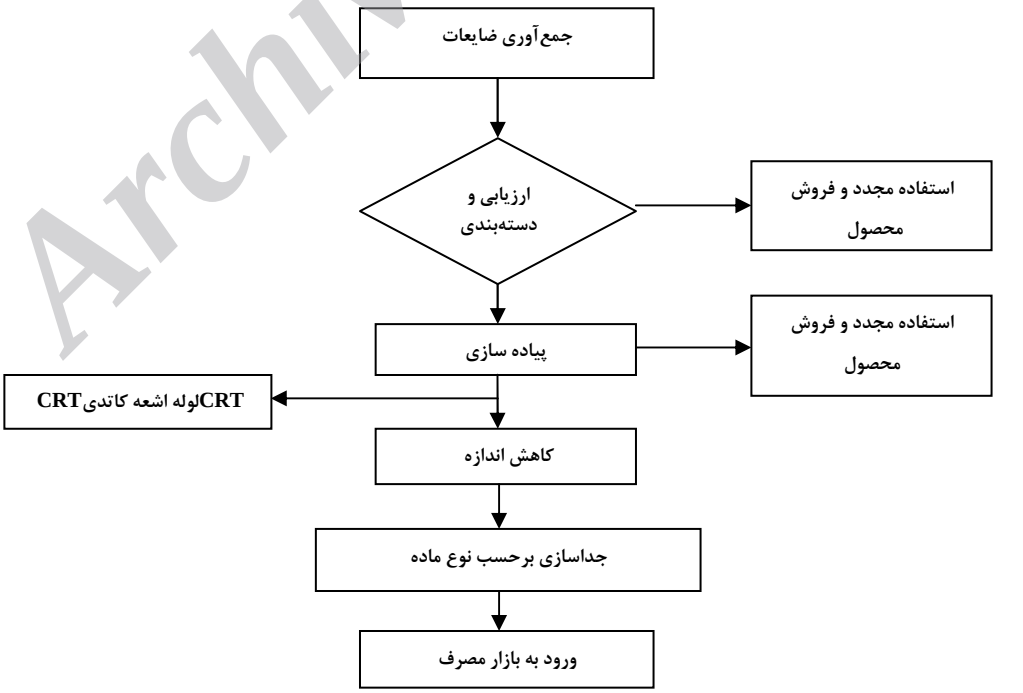
در این مرحله ذرات ریز حاصل از مرحله قبلی که شامل انواع گوناگونی از مواد هستند با توجه به تفاوت در پاره‌ای خصوصیات ویژهٔ فیزیکی و غیرفیزیکی، آنها طی فرایندهایی مورد عمل جداسازی قرار می‌گیرند. در این مرحله مواد خطرناک و سمی حذف شده و دفع می‌گردند.

۸-۶ ورود به بازار مصرف

در مرحله آخر مواد مختلف به‌دست آمده از فرایند بازیافت، برای فروش و استفاده به‌عنوان ماده خام در صنعت تولید تجهیزات الکترونیکی جدید وارد بازار مصرف می‌گردند.

۹- آلودگی زباله‌های الکترونیکی

زباله‌های الکترونیکی شامل مقدار زیادی از مواد خطرناک نظیر جیوه، سرب و کادمیم می‌باشند. این ترکیبات سمی و خطرناک در صورت ورود به آب و خاک و هوا می‌توانند صدمات جبران ناپذیری را به محیط زیست وارد کنند و سلامتی انسان و دیگر موجودات زنده را به مخاطره اندازند. به همین علت است که گفته می‌شود فرایند بازیافت باید زیر نظر متخصصان و در محل‌های ویژه‌ای که کاملا مسائل زیست محیطی در آن‌ها رعایت می‌گردد صورت پذیرد. در برخی کشورها و مناطق، قوانینی وضع شده است که کاربرد مواد خطرناک در تولیدات الکترونیکی را محدود می‌کند و مسایل مربوط به زباله‌های الکترونیکی را مدیریت نماید. اما در بسیاری کشورها چنین قوانینی وجود ندارد. شواهدی وجود دارد مبنی بر این که زباله‌های الکترونیکی به کشورهایی فرستاده می‌شوند و در آنجا اغلب در کارگاههای کوچک به‌طور غیر رسمی بازیافت و دفع می‌شوند. مقصد این زباله‌ها اغلب آسیا و برخی کشورهای آفریقایی مانند کشور غنا میباشد. به‌عنوان نمونه در کارگاه‌های محلی در کشور غنا، پیاده‌سازی قطعات الکترونیکی به‌طور دستی انجام می‌شود و برای جداسازی مس از پلاستیک از احتراق روباز استفاده میگردد. بخش اعظم این فعالیت‌ها نیز توسط کودکان و با ابزارهای ابتدایی و بدون تجهیزات ایمنی انجام می‌گیرد. بررسی‌های صورت گرفته روی نمونه‌هایی که از خاک آلوده به خاکستر سایت‌های زباله‌سوزی روباز در Agbogbloshie و Korforidua در غنا و از رسوبات مرداب



شکل ۳- مراحل کلی بازیافت ضایعات الکترونیکی

Archive of SID

www.SID.ir

کم‌عمقی در سایت Agbogbloshie جمع‌آوری شده‌اند، آلودگی شیمیایی زیادی داشتند. خصوصیات این نمونه‌های جمع‌آوری شده در جدول (۶) آورده شده است. نمونه‌های خاک یا خاکستر سایت‌های زباله‌سوزی روباز میزان بالایی از بسیاری از فلزات موجود در تجهیزات الکترونیکی را در خود داشتند. برخی از این فلزات سمی هستند. آلاینده‌های آلی بسیاری نیز شناسایی شده‌اند. بسیاری از این آلاینده‌های آلی یا در لوازم الکترونیکی به کار می‌روند یا در هنگام سوختن مواد به کار رفته در این تجهیزات تشکیل می‌شوند. بین نمونه‌های سایت‌های مختلف از لحاظ نوع فلزات و گسترهٔ ترکیبات آلی موجود شباهت‌هایی وجود دارد. ماهیت و میزان آلودگی شیمیایی این سایت‌ها در غنا مشابه با موارد گزارش شده در سایت‌های زباله‌سوزی روباز چین، هند و روسیه می‌باشد. نتیجه مواد فلزی یافت شده در نمونه‌های حاصل از سایت‌های زباله سوزی مورد بررسی، در جدول (۷) ارائه شده است.

در دو نمونه‌ی آلوده‌تر GH08002, GH08003 که از بازار Agbogbloshie جمع‌آوری شده‌اند، میزان برخی فلزات بسیار فراتر از میزان آنها در خاک‌های غیرآلوده است. میزان مس، سرب، قلع و روی بیش از صد برابر مقدار متداول است. اگرچه میزان آنتیموان و کادمیم در این نمونه‌ها کمتر است اما هنوز نشان‌دهندهٔ آلودگی است. نمونه مربوط به یک سایت زباله‌سوزی در Korforidua پروفایل آلودگی فلزی بالایی مشابه مورد قبلی را دارد و میزان مس و سرب از همان مرتبه بزرگی است. میزان آنتیموان، قلع و روی کمتر از مورد قبلی، اما هنوز ده برابر بیشتر از مقدار متداول است. یک منبع بالقوه عمدهٔ سرب، لحیم‌های الکتریکی است که تا سال‌های اخیر بخش اعظم آن مخلوطی از سرب و قلع بوده است. وجود میزان بالای این دو فلز در برخی نمونه‌ها نشان می‌دهد که لحیم حاصل از لحیم‌کاری قطعات یکی از منابع اصلی سرب در این سایت‌هاست. منبع دیگر سرب موجود در این نمونه‌های حاصل از زباله‌های الکترونیکی، ترکیبات سربی هستند که به‌عنوان پایدارساز پلی‌وینیل کلرید (PVC) به کار می‌روند. پی‌وی‌سی به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان روکش سیم‌ها و کابل‌ها به کار می‌رود. پایدارسازهای پی‌وی‌سی شامل ترکیباتی از فلزاتی مانند باریم، کادمیم و روی که به میزان زیاد در نمونه‌های آلوده یافت شده‌اند، نیز هستند. ترکیبات آنتیموان نیز در برخی موارد به بسپارها افزوده می‌شوند. میزان بالای مس به احتمال زیاد مربوط به قطعات سیم‌های مسی است. نگرانی اصلی مربوط به سرب و کادمیم است؛ زیرا هردو به شدت سمی هستند و با تماس مکرر در بدن تجمع پیدا می‌کنند[۱۸].

جدول ۶- توصیف نمونه‌های جمع‌آوری شده از مکان‌های دفع و سوزاندن روباز در Accra و Korforidua در غنا، سال ۲۰۰۸ میلادی[۱۸]

شماره نمونه	نوع نمونه	محل نمونه برداری
GH08001	(خاک / خاکستر)	منطقه زباله‌سوزی مجاور مرکز جمع‌آوری ضایعات در Korforidua
GH08002	(خاک / خاکستر)	محل زباله‌سوزی (بدون دفع)، بازار Agbogbloshie
GH08003	(خاک / خاکستر)	محل زباله‌سوزی (بدون دفع)، بازار Agbogbloshie
GH08004	(خاک / خاکستر)	محل زباله‌سوزی داخل منطقه دفع ضایعات، بازار Agbogbloshie
GH08005	خاک	زیر شیشه لوله اشعه کاتدی شکسته شده داخل منطقه دفع ضایعات، بازار Agbogbloshie
GH08006	رسوب	مرداب مجاور منطقه دفع و سوزاندن ضایعات، بازار Agbogbloshie

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۷- مواد فلزی یافت شده در نمونه‌های ۱ تا ۶ (GH08001 تا GH08006) [۱۸]

نمونه	GH08001	GH08002	GH08003	GH08004	GH08005	GH08006
نوع نمونه	(خاکستر/خاک)	(خاکستر/خاک)	(خاکستر/خاک)	(خاکستر/خاک)	خاک	رسوب
فلز	(mg/kg) dw*	(mg/kg) dw	(mg/kg) dw	(mg/kg) dw	(mg/kg) dw	(mg/kg) dw
Antimony	۱۵۹	۲۸۶	۵۹۲	۱۶	۸	۲۵۶
Arsenic	< ۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰
Barium	۲۷۰	۱۱۹۰	۱۲۶۰	۱۰۷	۱۱۴	۴۰۰
Beryllium	< ۰/۲	۰/۶	<۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۶
Bismuth	< ۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰
Cadmium	۳	۱۰	۱۰	<۱	<۱	۶
Chromium	۴۷	۴۵	۳۳	۲۷	۳۴	۳۴
Cobalt	۱۰	۶۸	۱۲۹	۱۳۵	۷	۱۹
Copper	۱۴۳۰۰	۷۲۴۰	۹۷۳۰	۱۱۹	۸۵	۲۲۶۰
Gallium	< ۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰
Germanium	< ۳۰	< ۳۰	<۳۰	<۳۰	<۳۰	<۳۰
Indium	< ۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰	<۲۰
Lead	۳۵۳۰	۴۱۶۰	۵۵۱۰	۱۱۰	۱۹۰	۱۶۸۵
Manganese	۲۹۷	۳۱۷	۲۷۲	۱۵۰	۱۷۱	۱۸۳
Mercury	۰/۶	< ۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۶	<۰/۵
Molybdenum	< ۴	< ۴	<۴	<۴	<۴	۳۱
Nickel	۹	۲۸	۳۳	۱۴	۲۱	۲۴
Selenium	<۳۰	<۳۰	<۳۰	<۳۰	<۳۰	<۳۰
Silver	< ۲	۷	۷	<۲	<۲	۲
Tin	۱۲۳	۱۲۹۰	۱۱۷۵	۷	۱۶	۲۲۰
Vanadium	۲۷	۳۸	۱۱	۲۳	۳۱	۲۶
Yttrium	۲	۸	۲	۴	۳۳	۹
Zinc	۳۸۲	۶۹۲۰	۱۸۹۰۰	۳۱۳۰۰	۲۷۴	۲۴۲۵

* (mg / kg) dw: (mg / kg) dry weight

Archive of SID

www.SID.ir

به‌عنوان نمونه‌ای دیگر می‌توان به مسئله آلودگی زباله‌های الکترونیکی در کشور چین که طبق گزارش‌ها مقصد ۷۰ درصد از زباله‌های الکترونیکی می‌باشد و کارگاه‌های محلی زیادی به‌منظور بازیافت این زباله‌ها در آن فعالیت می‌کنند، اشاره کرد. گروهی از محققان چینی نمونهٔ گرد و غبار جاده‌های اطراف کارگاه‌های بازیافت زباله‌های الکترونیکی در منطقه گویای چین را جمع‌آوری کردند. این گروه دریافتند که میزان سرب در این نمونه ۳۳۰ بار بیشتر از نمونه‌ای با فاصله ۵ مایلی از این مرکز و ۳۷۱ بار بیشتر از نمونه‌ای با فاصلهٔ ۱۹ مایلی آن است. در مورد مس این اعداد به ترتیب ۱۰۶ و ۱۵۵ برابر بود. خبرنگاری به نام مایکل ژائو برای تهیه فیلمی مستند در خصوص اثرات زباله‌های الکترونیک به شهری در جنوب چین سفر کرده است. وی در این خصوص می‌گوید: "من دیدم مردم تکه‌های ریز فلزی را روی اجاق‌هایی که با زغال سنگ روشن شده بود به امید دستیابی به طلا ذوب می‌کردند. این کار باعث تشکیل دود قرمز رنگی می‌شد که من قبل از سوختن چشمان خود محل را ترک کردم."[۱۹].

۱۰- راهکارها و پیشنهادات

۱- تهیه و تدوین قوانینی جامع و سازگار با محیط زیست در خصوص ساماندهی پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی. در همین راستا در کشور ما در خرداد ماه ۱۳۸۸ آیین‌نامه ساماندهی پسماندهای الکترونیکی از سوی سازمان حفاظت از محیط زیست تدوین شده و برای ارائه نظرات کارشناسی به وزارت صنایع و معادن ارسال گردیده است و سازمان حفاظت از محیط زیست نیز کارگروهی در این زمینه تشکیل داده است [۵].

۲- بازیافت زباله‌های الکترونیکی و استفاده مجدد از مواد فلزی و غیرفلزی تشکیل‌دهندهٔ آنها به‌منظور ساخت و تولید وسایل و تجهیزات مختلف. به‌عنوان نمونه می‌توان به اقدام شرکت مسئول تولید مدال‌های المپیک زمستانی ۲۰۱۰ وان‌کوور کانادا - شرکت Teck Resources- اشاره کرد. این شرکت تصمیم گرفت فلز مورد نیاز برای تولید مدال‌های المپیک را با فلزات بازیافتی از زباله‌های االکترونیک تهیه کند. این مدال‌ها با همکاری ضرابخانه ملی کانادا تولید می‌گردد. برای دستیابی به فلزات مورد نیاز برای ساخت مدال‌ها این شرکت مواد موجود در لامپ‌های اشعه کاتدی، قطعات مختلف رایانه‌ها و تجهیزات حرارت‌زا را جمع‌آوری کرده و با ترکیب آن‌ها با فلزاتی از دیگر منابع، مدال‌ها را تولید کرده است[۲۰].

۳- فرهنگ‌سازی به‌منظور جذب مشارکت مردمی و همکاری آنها و تهیه و تدوین پروژه‌هایی برای جمع‌آوری تجهیزات الکترونیکی و الکتریکی مستعمل توسط سازمان‌های دولتی و یا خصوصی.

۴- جذب سرمایه گذاران خصوصی برای احداث واحدهای بازیافت زباله‌های الکترونیک در کشور ما ایران از طریق تخصیص کمک‌های مالی و حمایت‌های اجرایی. البته شایان ذکر است که وزارت صنایع و معادن در طرحی، استان‌های فارس و تهران را به‌عنوان دو مرکز انباشت زباله‌های الکترونیکی در ایران در نظر گرفته است[۵]. همچنین طبق گفته مسئولان از سرمایه گذاران در زمینه بازیافت زباله‌های الکترونیک استقبال می‌شود.

۱۱- نتیجه‌گیری

همان‌طور که ذکر شد بازیافت زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی از ابعاد مختلف حائز اهمیت است. کاهش آلودگی‌های زیست محیطی با حذف و جداسازی مواد خطرناک و سمی موجود در زباله‌های الکترونیکی، کاهش مصرف انرژی و مواد خام از طریق استفادهٔ مجدد از مواد بازیافتی در ساخت تجهیزات جدید، و یا استفاده از موادی نظیر پلاستیک‌های موجود در آن‌ها به‌عنوان سوخت جایگزین در بعضی از واحدهای صنعتی، همچنین افزایش درآمدهای اقتصادی از طریق بازیابی فلزات گرانبها و دیگر ترکیبات ارزشمند باعث توجه ویژه سازمان‌های بین‌المللی و کشورهای مختلف به موضوع زباله‌های الکترونیک گردیده است. به‌منظور اجرای یک عملیات بازیافت مؤثر و کارآمد و با صرفه اقتصادی، بایستی در خصوص مسائل مهمی نظیر حجم زباله‌های الکترونیکی موجود در کشور و انواع مواد و ترکیبات تشکیل‌دهنده این تجهیزات، فرایندهای مختلف فیزیکی و مکانیکی مورد استفاده در جداسازی و بازیافت مواد، و نیز راهکارهای مقابله با آلودگی‌های زیست محیطی به هنگام عملیات بازیافت و محدودیت‌هایی که به هنگام بازیافت وجود دارد نظیر تنوع زیاد محصولات و تنوع روش‌های مورد نیاز برای بازیافت مواد مختلف و دیگر مشکلات،

Archive of SID

www.SID.ir

شناخت صحیحی بعمل آید. از آنجا که صنعت بازیافت بخصوص در کشور ما ایران هنوز در آغاز کار است، در این راه باید سازمان‌ها و نهادهای دولتی با تخصیص کمک‌های مالی و حمایت‌های همه جانبه از سرمایه‌گذاران در این صنعت حمایت نمایند. البته سازمان-های مسئول نظیر سازمان حفاظت محیط زیست نیز باید با نظارت-های دقیق و پیوسته بر اجرای مناسب قوانین زیست محیطی توسط بازیافت کنندگان نظارت کنند.

۱۲-تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از زحمات جناب آقای مهندس حسن برجعلیزاده و سرکار خانم مهندس عادله دارابی که در تهیه این مقاله همکاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

[1] "Electronic Waste Management in the United States, Approach 1" Table 3. 1 EPA530-R-08-009 US Environmental Protection Agency, http://www. epa. gov/osw/conserve/materials/ecycling/docs/app-1. pdf. (July 2008).

[2] European Commission, Draft proposal for a European parliament and council directive on waste electric and electronic equipment,Bassels, 2000, Belgium, http: //www. eia. org/download/eic/21/www Final Proposal June 2000. htm,2000-07-31.

[3] H. Brandl, R. Bosshard, M. Wegmann, "Computer-munching microbes: Metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi", Process Metallurgy, Volume 9, 1999, Pages 569-576.

[4] Silicon valley toxic coalition,Just say no to E-waste: Background document on hazards and waste from computers, http://www. svtc. org/cleancc/pubs/sayno. htm,2003-01-06

[۵] دنیای اقتصاد، شماره ۱۸۲۴، ۴ شنبه ۲۷ خرداد ۱۳۸۸، کد خبر DEN-161387، www. donya-e-eqtesad. com

[6] Association of plastics manufactures in Europe (APME),Plastics-a material of choice for the-- electric and electronic industry--plastics consumption and recovery in western Europe 1995, AMPE report code 98-2004, Brussels, Belgium, p. 1.

[7] S. Zhang, E. FForssberg,"Optimization of electrodynamic separation for metals recovery from electronic scrap", Resour. Conserv. Recycle 22, 143-162, (1998).

[8] E. Y. L. Sum, "The recovery of metals from electronic scrap", JOM 43, 53-61, (1991).

[9] J. Cui,E. Forssberg, "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. ", Journal OF Hazardous Materials B99, 243-263, (2003).

[10] Mark FE,Lehner T. "Plastics recovery from waste electrical & electronics equipmentinnon-ferrous metal processes". Association of Plastics Manufactures in Europe (APME); (2001).

[11] United States Geological Survey (USGS). Obsolete computers, "gold mine", or high-tech trash? Resources recovery from recycling, USGS fact sheet,FS-060-01; (2001).

[12] American plastics council. Plastics from residential electronics recycling. Report; (2000).

[13] Association of Plastics Manufactures in Europe (APME). An analysis of plastics consumption and recovery in Europe; (2003).

[14] H. Y. Kang,J. M. Schoenung, "Electronic waste recycling: A review of U. S. infrastructure and technology option", Resource Conservation and recycling 45, 368-400, (2005).

[15] Environmental and Plastics Industry Council. Management of plastics in EOL electronics. Special news and views report; (2003).

[۱۶] سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری مشهد www. roomm. ir

[17] Northeast Recycling Council, Inc. (NERC). Setting up and operating electronics recycling/reuse programs:a manualfor municipialities and counties; March (2002).

[18] K. Brigden,I. Labunska,D. Santillo,P. Johnston, "Chemical contamination at e-waste recycling and disposal sites in Accra and Korforidua,Ghana", published in August 2008 by Greenpeace International., www. greenpeace. org.

[19] www. time. com/time/health/article/0,8599,1819127,00. html

[20] www. jamejamonline. ir/newstext. aspx?newsnum 100920315761

Archive of SID

www.SID.ir