

# زباله‌های تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی

## یک منبع با ارزش جهت بازیافت

حامد دارابی، سهیلا یغمایی\*

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پیام‌نگار: yaghmaei@sharif.edu

### چکیده

رشد و توسعه تولید تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی از یک سو و عمر مفید کوتاه این تجهیزات از سوی دیگر باعث به وجود 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 به منظور 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 به طور 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

### ۱- مقدمه

تولید تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی<sup>۱</sup> (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 سازنده 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 زیست‌محیطی ناشی از مواد خطرناک و سمی موجود در این 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 بازیافت‌کنندگان می‌گردد. با در نظر گرفتن این مسائل، بازیافت زباله‌های الکترونیکی می‌تواند اهمیت به‌سزایی داشته باشد. بنابراین بایستی در این زمینه با یک مدیریت مناسب و برنامه کارآمد، فعالیت شود. عوامل متعددی در طراحی یک راهکار مؤثر و

1. EEE: Electric and Electronic Equipment

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 تجهیزات 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 و 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 الکترونیکی و الکترونیکی (WEEE)

ضایعات تجهیزات الکترونیکی 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.

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 الکترونیکی و الکترونیکی حاصل از تجهیزات مختلف نظیر کامپیوترهای کهنه، بُردهای مدارهای الکترونیکی، 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 الکترونیکی و الکترونیکی در سال ۱۹۹۸ ایجاد شده است. انتظار می‌رود که این میزان حداقل ۳ تا ۵ درصد در سال افزایش یابد [۲]. در سوئیس سالانه حدود ۱۱۰۰۰۰ تن تجهیزات الکترونیکی 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

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.

### ۱-۳ ترکیب مواد اجزای سازنده

ضایعات تجهیزات الکترونیکی و الکترونیکی شامل تعداد زیادی از مواد گوناگون فلزی و غیر فلزی با ترکیب درصدهای مختلف است. اتحادیه سازندگان پلاستیک در اروپا<sup>۱</sup> (APME) جدولی از میزان مواد موجود در ضایعات تجهیزات الکترونیکی و الکترونیکی موجود در غرب اروپا در سال ۱۹۹۵ منتشر کرده است [۶]. به‌طور کلی برد مدارهای الکترونیکی که در اکثر تجهیزات الکترونیکی وجود دارد تقریباً شامل ۴۰٪ فلز، ۳۰٪ پلاستیک و ۳۰٪ سرامیک می‌باشد [۷ و ۸].

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 الکترونیکی و الکترونیکی (EEE) به‌منظور مقایسه آورده شده است [۷].



جدول ۲- مواد اصلی یافت شده در تجهیزات

الکترونیکی و الکترونیکی [۶]

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

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

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

مواد	چگالی ( $\times 10^3 \text{ kg. m}^{-3}$ )	رسانایی الکتریکی ( $\times 10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ )
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

آمار و نتایج حاصل از برنامه‌های محلی جمع‌آوری ضایعات الکترونیکی خانگی در ایالات متحده آمریکا 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<sup>۲</sup> 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.

### ۲-۳ ویژگی‌های مغناطیسی، چگالی و هدایت الکتریکی

از میان خواص مواد به‌کار رفته در ساخت تجهیزات الکترونیکی و الکترونیکی، خاصیت مغناطیسی، چگالی و هدایت الکتریکی نقش

### ۳-۳ اندازه ذره و شکل

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

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

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]

درصد	مزایا
۷۴	صرفه جویی در انرژی
۹۰	صرفه جویی در استفاده از مواد خام
۸۶	کاهش آلودگی هوا
۴۰	کاهش مصرف آب
۷۶	کاهش آلودگی آب
۹۷	کاهش زباله های معدنی
۱۰۵	کاهش زباله های تولیدی مصرف کنندگان

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 می باشد [۱۰]. زباله های الکترونیکی و الکترونیکی حاوی مقدار زیادی پلاستیک هستند که با بازیافت مواد پلاستیکی موجود در آنها، هم می توان از پلاستیک های بازیافت شده در ساخت مواد پلاستیکی جدید بهره گرفت و هم می توان از آنها به عنوان سوخت استفاده کرد؛ این عمل "بازیافت گرمایی" نامیده می شود. برای مثال ۱ تن پلاستیک می تواند جایگزین ۱/۳ تن زغال سنگ در کوره های سیمان شود [۱۱]. انجمن سازندگان پلاستیک در اروپا بازیافت گرمایی را بهترین گزینه از لحاظ محیط زیست برای مدیریت پلاستیک های ضایعات الکترونیکی در اروپا می داند [۱۲]. در سال ۲۰۰۲، سوئیس و دانمارک حدود ۷۰٪ وزنی کل زباله های پلاستیکی خود را به طریق گرمایی بازیافت کردند [۱۳]. در ایالات متحده امریکا، پلاستیک های بازیافتی از لوازم الکترونیکی به طور عمده در الوارهای پلاستیکی، مبلمان شهری و مواد مورد نیاز در صنعت جاده سازی به کار می روند.

یک محدوده اندازه مؤثر خاص ذرات دارای بیشترین بازدهی و بهترین عملکرد می باشند. به طور کلی هرچه ذرات تشکیل دهنده یک قطعه الکترونیکی که قرار است بازیافت گردد، بیشتر خرد گردند و ریزتر شوند، درصد میزان جداسازی مواد موجود در قطعه الکترونیکی افزایش می یابد. مطالعات صورت گرفته روی مشخصات ضایعات کامپیوترهای شخصی (PC) <sup>۱</sup> و برد مدارهای چاپی الکترونیکی (PCB) <sup>۲</sup> نشان داده است که بعد از خرد کردن ثانویه توسط یک خردکن چکشی، فلزات اصلی موجود در یک قطعه برد مدار الکترونیکی (PCB) به ضخامت ۵ میلیمتر به میزان بسیار زیادی جدا می شوند [۷]. همچنین آزمایش های انجام شده در مقیاس صنعتی نشان داده است که بعد از ۲ مرحله خرد کردن، 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 شده اند 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 می توان در مصرف انرژی و مواد خام صرفه جویی کرد. سازمان حفاظت محیط زیست امریکا جدولی از میزان صرفه جویی در مصرف انرژی با به کارگیری مواد بازیافتی در مقابل مواد خام ارائه کرده است [۹]:

جدول ۴- میزان صرفه جویی در مصرف انرژی با

به کارگیری مواد بازیافتی [۹]

ماده بازیافتی	صرفه جویی 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

## 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 امکان‌سنجی شده و نیز از حمایت اجتماعی برخوردار باشند. در حال حاضر موضوع بازیافت ضایعات الکترونیکی پدیده‌ای 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 آمریکا و نیز کشورهای اروپایی که تجربیات و فعالیت‌های گسترده‌ای در زمینه بازیافت ضایعات دارند و آمار و ارقام بسیاری در زمینه بازیافت ضایعات الکترونیکی منتشر کرده‌اند استفاده کرد. سازمان بین‌المللی بازیافت تجهیزات الکترونیکی (IAER)<sup>۱</sup> اعلام کرده است که در سال ۲۰۰۳ میلادی حدود ۷۰۰۰ کارمند در آمریکا در این صنعت مشغول بکار بوده و درآمدی بیش از ۷۰۰ میلیون دلار آمریکا نصیب این کشور شده است [۱۴]. همانطور که قبلاً هم ذکر شد محصولات الکترونیکی شامل مواد و ترکیبات متعدد بوده و از ادغام فن‌آوری‌های مدرن و متعدد حاصل شده‌اند. این بدان معنی است که برای بازیافت مؤثر، بسیاری از بخش‌ها، 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 زیرساخت 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، مصرف‌کنندگان 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

1. IAER: International Association of Electronics Recyclers

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 الکترونیکی اقدام به دایر کردن سیستم‌های جمع‌آوری برای گردآوری ضایعات الکترونیکی کرده‌اند. 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 الکترونیکی 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 الکترونیکی و الکترونیکی را جدا و تفکیک می‌نمایند و در صورت نیاز می‌توان از این قطعات دوباره استفاده کرد [۱۶]. در ایالات متحده آمریکا 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 تقریباً ۵۰۰ برنامه جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی به اجرا درآمده است. این برنامه‌ها در ۳۰ ایالت از ۵۰ ایالت آمریکا اجرا شده است. بیشترین 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

## 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.

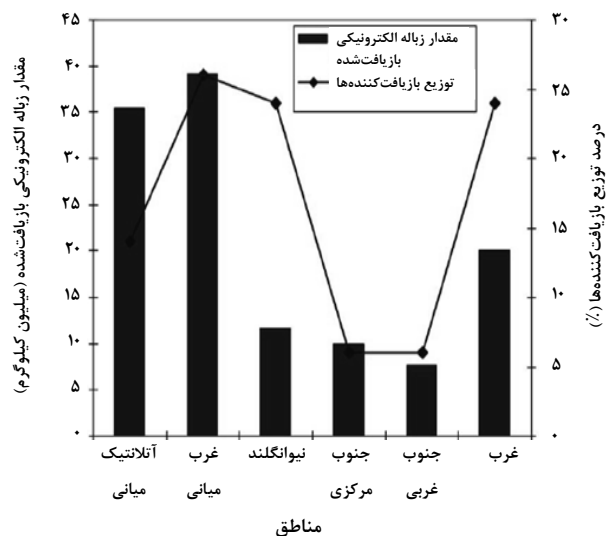
## ۸-۳ پیاده‌سازی

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 جدا شده، قطعاتی را که امکان استفاده دوباره و فروش مجدد آن‌ها وجود دارد از سایر قطعات جدا می‌کنند. مثلاً 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 کامپیوتر استفاده 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 بزرگ‌ترین منابع سرب در زباله‌های جامد شهری به حساب می‌آیند و به‌دلیل خطراتی که سرب برای محیط‌زیست دارد، بایستی در بازیافت آن‌ها مسائل ایمنی بدقت رعایت گردد.

## ۸-۴ کاهش اندازه

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

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 آمریکا 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<sup>۱</sup>، نیوانگلند<sup>۲</sup> و غرب<sup>۳</sup> متمرکز شده‌اند که در هر یک تقریباً یک چهارم شرکت‌های بازیافت موجود می‌باشند. همچنین مشخص است که مناطق غرب میانی و آتلانتیک میانی<sup>۴</sup> بالاترین سطح فعالیت بازیافتی را دارند و پس از آن‌ها منطقه غرب قرار دارد [۱۴].



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

## ۸-۱ مراحل کلی فرایند بازیافت ضایعات

### ۸-۱-۱ 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.

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

زنده را به مخاطره اندازند. به همین علت است که گفته می‌شود فرایند بازیافت باید زیر نظر متخصصان و در محل‌های ویژه‌ای که کاملاً 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 Korforidua و Agbogbloshie در رسوبات مرداب

#### ۸-۵ جداسازی بر حسب نوع ماده

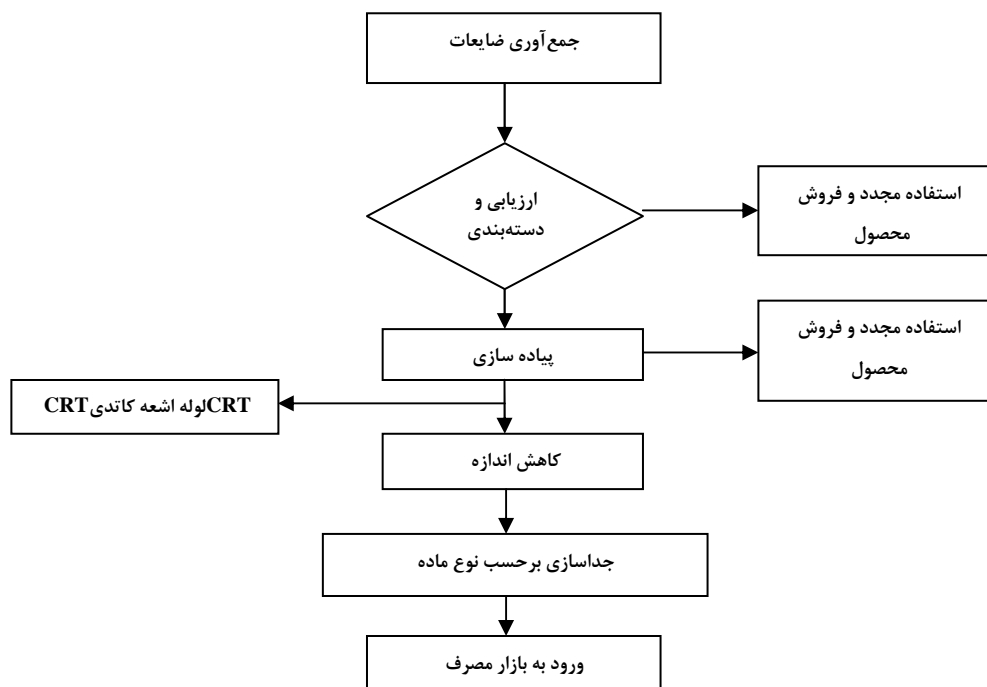
در این مرحله ذرات ریز حاصل از مرحله قبلی که شامل انواع گوناگونی از مواد هستند با توجه به تفاوت در پاره‌ای خصوصیات ویژه فیزیکی و غیرفیزیکی، آنها طی فرایندهایی مورد عمل جداسازی قرار می‌گیرند. در این مرحله مواد خطرناک و سمی حذف شده و دفع می‌گردند.

#### 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



شکل ۳- مراحل کلی بازیافت ضایعات الکترونیکی

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 عمده 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 باریوم، کادمیم و روی که به میزان زیاد در نمونه‌های آلوده یافت شده‌اند، نیز هستند. ترکیبات آنتیموان نیز در برخی موارد به‌سپارها 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].

کم‌عمقی در سایت Agboglobloshe 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 گستره 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 زباله‌سوزی مورد بررسی، در جدول (۷) ارائه شده است.

در دو نمونه‌ی آلوده‌تر GH08002, GH08003 که از بازار Agboglobloshe 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 نشان‌دهنده آلودگی

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 Agboglobloshe
GH08003	(خاک / خاکستر)	محل زباله‌سوزی (بدون دفع)، بازار Agboglobloshe
GH08004	(خاک / خاکستر)	محل زباله‌سوزی داخل منطقه دفع ضایعات، بازار Agboglobloshe
GH08005	خاک	زیر شیشه لوله اشعه کاتدی شکسته شده داخل منطقه دفع ضایعات، بازار Agboglobloshe
GH08006	رسوب	مرداب مجاور منطقه دفع و سوزاندن ضایعات، بازار Agboglobloshe



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

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

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

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 سرمایه‌گذاران خصوصی برای احداث واحدهای بازیافت زباله‌های الکترونیکی 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 سرمایه‌گذاران 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 استفاده مجدد از مواد بازیافتی در ساخت تجهیزات جدید، و یا استفاده از مواد 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 به‌هنگام عملیات بازیافت و محدودیت‌هایی که به‌هنگام بازیافت وجود دارد نظیر تنوع زیاد محصولات و تنوع روش‌های مورد نیاز برای بازیافت مواد مختلف و دیگر مشکلات،

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 نمونه 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 فاصله 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 تکه-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 تشکیل‌دهنده 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 الکترونیک تهیه کند. این مدال‌ها با همکاری ضرابخانه ملی کانادا تولید می‌گردد. برای دستیابی به

- [7] S. Zhang, E. FForsberg, "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. Forsberg, "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 equipment in non-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 manual for municipalities 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?newsnum100920315761

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 سازمان‌های مسئول نظیر سازمان حفاظت محیط زیست نیز باید با نظارت‌های دقیق و پیوسته بر اجرای مناسب قوانین زیست محیطی توسط بازیافت کنندگان نظارت کنند.

## ۱۲- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات جناب آقای مهندس حسن برجعلیزاده و سرکار خانم مهندس عادلہ 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/conserves/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](http://www.eia.org/download/eic/21/www%20Final%20Proposal%20June%202000.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-egtesad.com](http://www.donya-e-egtesad.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.