JIPET | Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology/ Vol. 11/ No. 41/ Spring 2020
P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/

Investigating Methods of Electronic Waste Management and Recycling of Ever-Increasing Electronic Wastes with Emphasis on Eco-Friendly Processes

Saman Madanian[1,2], *B.Sc*, Sayed Mohammad Ali Zanjani[1,2], *Assistant Professor*

[1] Digital Processing and Machine Vision Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
[2] Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran.
saman_madanian@sel.iaun.ac.ir
sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir

Abstract:

Electronic waste (E-waste) consists of obsolete electrical or electronic devices. Electronic waste recycling is of importance when it comes to protecting resources and environment. Today, nearly 1.3 billion tons/year of waste is produced worldwide, which is expected to increase to 4.3 billion tons/year by 2025. E-waste from old PCs is predicted to increase to 500 percent over a decade, and by 2020, compared to 2007, the disposal of cell phones will be increased by almost 18 times. Understanding and distinguishing different components of E-waste can help their efficient recycling. Sophisticated electronic devices contain approximately 60 different elements, which include valuable and hazardous materials. The most valuable component of E-waste is PCB, which contain many hazardous materials besides valuable metals. To prevent human and environmental poisoning, it is necessary to analyze the properties and compounds of different materials in E-waste and to find ways of re-managing it using healthy and environmentally friendly processes. In this paper, we focus on the general E-wasteland problems, such as the classification of E-waste, its constituents, various eco-friendly waste managemen-nt and recycling processes, as well as considering valuable metals extraction. Despite many efforts to develop the recycling technology, this technology has many disadvantages due to the complexity of E-waste treatment systems. Therefore, the disadvantages of each process are discussed by considering technical problems and environmental protection level.

Keywords: Electronic waste, waste management, environmental pollution, block chain, power pulse.

Received: 6 November 2019
Revised: 15 March 2020
Accepted: 19 April 2020

Corresponding Author: Dr. Sayed Mohammad Ali Zanjani

Citation: S. Madanian, S.M.A. Zanjani, "Investigating methods of electronic waste management and recycling of ever-increasing electronic wastes with emphasis on eco-friendly processes", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 41, pp. 61-71, Spring 2020 (in Persian).

بررسی روش‌های مدیریت و بازیافت زباله‌های روبه رشد الکترونیکی با تاکید بر فرآیندهای سازگار با محیط زیست

سامان مدنیان[۲،۱]، دانشجوی کارشناسی‌ارشد، سید محمدعلی زنجانی[۲،۱]، استادیار

۱- مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۲- دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
saman_madanian@sel.iaun.ac.ir
sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir

چکیده: زباله‌های الکترونیکی (E-waste) شامل دستگاه‌های الکتریکی یا الکترونیکی منسوخ شده هستند. بازیافت زباله‌های الکترونیکی از نظر حفاظت از منابع و محیط زیست یک موضوع مهم است. در حال حاضر، سالانه نزدیک به ۱/۳ میلیارد تن زباله در سراسر جهان تولید می‌شود که انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۵ به ۴/۳ میلیارد تن در سال افزایش یابد. پیش‌بینی شده-است که تولید زباله‌های الکتریکی از رایانه‌های قدیمی ۵۰۰درصد طی یک دهه افزایش یابد و در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۰۷، تلفن‌های همراه دور انداخته شده تقریباً ۱۸ برابر بیشتر خواهد شد. شناخت و درک اجزای مختلف زباله‌های الکترونیکی به بازیافت مؤثرشان کمک می‌کند. تجهیزات الکترونیکی پیشرفته شامل تقریباً ۶۰ عنصر مختلف شامل مواد با ارزش و خطرناک است. مهمترین اجزای ارزشمند زباله‌های الکتریکی، مدارهای چاپی (PCBs) هستند که به‌غیر از فلزات باارزش، حاوی مواد خطرناک بسیاری می‌باشند. برای جلوگیری از مسمومیت انسان و محیط زیست، تجزیه و تحلیل ویژگی‌ها و ترکیبات مواد مختلف در زباله‌های الکترونیکی و تعیین نحوه مدیریت مجدد آن‌ها از طریق فرآیندهای زیست محیطی سالم، امری ضروری به حساب می‌آید. در این مقاله، به طرح کلی مشکلات E-Wastelands شامل دسته‌بندی زباله‌های الکترونیکی، ترکیبات آن، مدیریت و فرآیندهای بازیافتی مختلف و سازگار با محیط زیست و توجه به استخراج فلزات با ارزش اشاره می‌شود. با وجود تلاش‌های بسیاری که برای توسعه فناوری بازیافت شده است؛ اما به دلیل پیچیدگی سامانه زباله‌های الکترونیکی، این فناوری همچنان دارای معایب بسیاری است. بنابراین در ادامه، درباره معایب هر فرآیند از نظر مشکلات فنی و درجه حفاظت از محیط زیست نیز بحث می‌شود.

کلمات کلیدی: زباله‌های الکترونیکی، مدیریت زباله، آلودگی محیط زیست، زنجیره بلوک، پالس قدرت.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۸/۱۵
تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید محمدعلی زنجانی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

پیشرفت علم و فن‌آوری باعث ایجاد رقابت بین تولیدکنندگان تجهیزات برق و الکترونیک در جهت عرضه سریعتر محصولات به بازار شده‌است. محصولات مقرون به‌صرفه و با ویژگی‌های پیشرفته، کاربران را تشویق به جایگزینی محصولات جدید با ادوات و دستگاه‌های قدیمی می‌کنند. ضایعات الکترونیکی، تجهیزات الکترونیکی دور انداخته شده بدون استفاده مجدد به شمار می‌آیند [۱]. این ضایعات، شامل تمام کالاهای موجود که عمرشان به پایان رسیده و یا برای کاربر مفید نیستند می‌شود. هر خانه یا کسب و کار دارای زباله‌های الکترونیکی شامل مدارهای رهاشده، اجزای الکتریکی و منابع برق یا باتری می‌شود. تلویزیون، سامانه تهویه مطبوع، یخچال و فریزر، لامپ‌های فلورسنت و جیوه‌ای، رایانه، چاپگر، دستگاه فتوکپی، تلفن همراه و گوشی، حجم زیادی از زباله‌های الکترونیکی را تشکیل می‌دهند. مقدار زباله الکترونیکی که در سراسر جهان تولید می‌شود، به‌میزان قابل ملاحظه‌ای در حال افزایش است. کشورهای پیشرفته از بزرگترین مراکز تولید این زباله‌ها هستند و درصورتی که به‌درستی عمل نکنند، تولیدکننده بسیاری از اجزای سمی هستند که تاثیر منفی بر سلامت انسان و محیط زیست دارند. اغلب این خطرات به‌دلیل فرایندهای بازیافت و دفع نامناسب به‌وجود می‌آیند [۲]. عناصر خطرناک در زباله‌های الکترونیکی عبارتند از: سرب، جیوه، آرسنیک، کادمیوم [۳]. البته حضور فلزات گرانبها مانند طلا، نقره و پلاتین در این دسته از زباله‌ها، وسوسه برانگیز است.

روش‌های غیراخلاقی مانند استخراج، سوزاندن، حمام اسیدی، دفن بدون تصفیه و غیره از کارهای بخش‌های غیررسمی در دفع زباله‌های الکترونیک است. در ادامه این مقاله، در بخش دوم به طبقه‌بندی انواع زباله‌های الکترونیکی اشاره می‌شود. بخش سوم به ترکیبات و ویژگی‌های زباله الکترونیکی می‌پردازد. بخش چهارم درباره چگونگی مدیریت زباله‌های الکترونیکی[1] و راه‌های عمده از بین بردن آنها بحث می‌کند. بخش پنجم درباره قراردادهای هوشمند مبتنی بر زنجیره بلوک است که می‌توانند در مدیریت این زباله‌ها بسیار مفید باشند. در بخش ششم، دو فرایند نوین مقابله با زباله‌های الکترونیکی که سازگاری فراوانی با محیط زیست دارند، بررسی می‌شود و درنهایت در بخش هفتم، به نتیجه‌گیری کلی درباره این موضوع پرداخته می‌شود.

۲- طبقه‌بندی زباله‌های الکترونیکی

بر اساس دستورالعمل‌های WEEE EC/۹۶/۲۰۰۲ و EU/۱۹/۲۰۱۲، زباله‌های الکترونیکی به انواع مختلفی طبقه‌بندی شده است [۴،۵] که عبارتند از: لوازم خانگی بزرگ و کوچک، تجهیزات مخابراتی و فناوری اطلاعات، تجهیزات مصرفی، وسایل روشنایی، ابزارهای غیر-الکتریکی و غیر-صنعتی، اسباب بازی‌ها، لوازم آرایشی و ورزشی، دستگاه‌های ضدعفونی پزشکی، مانیتورها و واحدهای کنترل و دستگاه‌های اتوماتیک که در جدول (۱) نشان داده شده است [۶-۸].

Table (1): Different types of electronic waste

جدول (۱): انواع مختلف زباله‌های الکترونیکی

دسته بندی‌های زباله‌های الکترونیکی	
دسته ۱	تجهیزات کنترل و نظارت
دسته ۲	ابزارهای الکتریکی و الکترونیکی
دسته ۳	تجهیزات مخابراتی و فناوری اطلاعات
دسته ۴	تجهیزات اتوماتیک بدون اسپانسر
دسته ۵	اسباب بازی، تجهیزات تفریحی و ورزشی
دسته ۶	لوازم خانگی (بزرگ و کوچک)
دسته ۷	وسایل الکترونیک مصرفی
دسته ۸	تجهیزات پزشکی

۳- ترکیبات و ویژگی‌های زباله‌های الکترونیکی

ترکیب ساختاری ضایعات الکترونیکی به نوع و مدل دستگاه الکترونیکی، سازنده آن، تاریخ تولید و سن قراضه بستگی دارد. مقادیر بیشتر فلزات گرانبها در قراضه سیستم‌های مخابراتی و فن‌آوری اطلاعات و ضایعات وسایل خانگی وجود دارد [۱۰]. به عنوان مثال، یک تلفن همراه حاوی بیش از ۴۰ عنصر از فلزات پایه مانند مس (Cu)، قلع (Sn) و فلزات گرانبها مانند نقره (Ag)، طلا (Au) و پالادیوم (Pd) است [۱۲،۱۱]. فیبر مدار چاپی در اکثر تجهیزات الکترونیکی دارای عناصر سمی مانند آرسنیک (As)، کروم (Cr)، سرب (Pb) و جیوه (Hg) است. لامپ اشعه کاتدی[۲] (CRT) موجود در تلویزیون و نمایشگرهای کامپیوتر حاوی باریم، مس، سرب، روی و سایر فلزات خاکی کمیاب است. بنابراین، اکثر کشورها، دفن لامپ اشعه کاتدی در زمین را ممنوع کرده‌اند [۱۳]. شرایط اقتصادی، بازار استفاده مجدد و نیز صنعت بازیافت در زمینه برنامه‌های جداسازی زباله، ازجمله عوامل تاثیرگذار بر موضوع زباله‌های الکترونیکی هستند [۹،۸].

۴- فرایندهای مختلف مدیریت زباله‌های الکترونیکی

طبق مطالعات انجام گرفته برخی از فرایندهای مدیریتی در برخورد با زباله‌های الکترونیکی شامل موارد زیر است:

۴-۱- دفن در زمین

دفن برخی از مواد زائد مانند باتری‌ها در زمین، باعث آزادشدن مواد اسیدی و فلزات سنگین مانند جیوه، نیکل و نیز کادمیوم می‌شود. این امر اغلب می‌تواند منجر به آلودگی آب‌های زیرزمینی شود. آب آلوده با سایر منابع آب، مانند آب رودخانه‌ها مخلوط شده و با مصرف آن توسط حیوانات و انسان ها، آسیب‌های شدیدی به آنها تحمیل می‌شود [۱۴].

۴-۲- سوزاندن

عملیات حرارتی بر روی زباله‌های الکترونیکی توسط دو روش سوزاندن و پیرولیز (گرم‌کردن ماده در غیاب اکسیژن) انجام می‌شود. این کار معمولاً به‌عنوان جای‌گزینی برای سایر روش‌های دفع، به‌ویژه دفن در زمین است. هنگام سوزاندن مواد زائد، حجم آنها کاهش یافته و انرژی درونی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در پیرولیز، زباله به روغن، زغال چوب و گازهای دودی تبدیل می‌شود. درهنگام سوختن ورقه‌های پلاستیکی یا PVC، بخارها شامل آروماتیک‌های چند حلقه‌ای سرطان‌زا، دی‌اکسین‌ها و دی انزوفوران‌های پلی‌کربنات هستند و گازهایی مانند دی اکسید کربن، گوگرد و نیتروژن آزاد می‌شوند و مقادیر جزئی اکسید فلزات سنگین در دود به جا می‌ماند. گرچه سوزاندن، یک فرایند ساده و کم‌هزینه است، اما به‌دلیل آلودگی محیط زیست، ممنوع شده است [۱۵،۱۶].

۴-۳- استفاده مجدد

در کشورهای در حال توسعه، اکثر کامپیوترهای قدیمی غیر-کارگاهی، تعمیر و پس از تغییرات جزئی، مجدداً فروخته می‌شوند. حدود ۳ درصد تا ۵ درصد از رایانه‌هایی که توسط کاربران رها شده‌اند، مورد استفاده مجدد واقع شده است [۱۷]. بدیهی است این دستگاه‌های کهنه، عمر محدودی دارند و درنهایت امروز یا فردا عمرشان به پایان می‌رسد. با این حال، انگیزه‌های تجاری خرده‌فروشان و مصرف‌کنندگان منجر به توسعه این بازار شده است [۱۸].

۴-۴- بازیافت

بازیافت زباله‌های الکترونیکی شامل جداسازی و یا تخریب تجهیزات معیوب برای استفاده مجدد از مواد آنها درجهت صرفه-جویی قابل توجه انرژی است. این کار، یک جای‌گزین برای دفع زباله‌های "متعارف" است که می‌تواند منجر به ذخیره مواد و کاهش گازهای گلخانه‌ای شود [۱۹]. هدف اول از بازیافت ضایعات الکترونیکی، کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از مواد خطرناک و اطمینان از بازیافت حداکثری مواد است. برای رسیدن به این اهداف، باید اطلاعات دقیقی از اجزای E-waste برای انتخاب روش مناسب بازیافت و تجهیزات مورد نیاز آن وجود داشته باشد [۲۰].

۴-۵- مدیریت ضایعات الکترونیکی به‌وسیله قراردادهای هوشمند مبتنی بر زنجیره بلوک

زنجیره بلوک یا بلاک‌چین فن‌آوری است که ما را قادر به نوشتن قراردادهای هوشمند می‌کند. قراردادهای هوشمند، کدهای کامپیوتری خود را اجرا می‌کنند که در شرایط خاص، اقدامات مشخصی را انجام می‌دهند [۲۱]. به‌عنوان نمونه‌ای از مدیریت ضایعات با قراردادهای هوشمند، دولت هند قوانین مدیریت زباله‌های الکترونیکی (EWM) را در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ ارتقاء داده است. این قوانین گامی مطلوب، به‌جای دفع زباله‌های الکترونیکی در محیط زیست است؛ هرچند هنوز آنها به‌خوبی رعایت نمی‌شوند. مثلاً درحال حاضر، جمع‌آوری و بازیافت زباله‌های الکترونیکی عمدتاً به‌وسیله بخش‌های غیرقانونی است که اجرای چنین قراردادهایی را بسیار دشوار می‌کند؛ اما در مدیریت EWM بااستفاده از قراردادهای هوشمند، هماهنگی بیشتری بین تولیدکنندگان، واردکنندگان، خرده فروشان و بازیافت‌کنندگان تجهیزات الکترونیکی و الکتریکی[۳] (EEE) ایجاد می‌شود. این امر، دولت را قادر خواهد ساخت تا جمع‌آوری و بازیافت زباله‌های الکترونیکی را کنترل کند. همچنین این امر منجر به افزایش شفافیت در تمام مراحل می‌شود تا عدم تعادل بین بخش‌های سازمان‌یافته و غیرسازمان‌یافته را کاهش دهد [۲۱].

اگر کشورهای پیشرفته و درحال توسعه، در مدیریت ضایعات الکترونیکی به‌درستی عمل نکنند، باعث به‌وجودآمدن ترکیباتی از مواد سمی خطرناک که تاثیر منفی بر سلامت انسان و محیط زیست دارد، می‌شوند [۲۳،۲۲]. اغلب این خطرات به‌دلیل فرایندهای بازیافت و دفع نامناسب بوجود می‌آیند [۲۴]. سرب، جیوه، آرسنیک، کادمیوم، فلزات آهنی و غیرآهنی، پلاستیک، شیشه، فیبر مدار چاپی و لاستیک ازجمله این مواد خطرناک هستند [۲۵،۳]. ازطرفی حضور فلزات گرانبها مانند طلا، نقره و پلاتین در این دسته زباله‌ها، بخش‌های غیررسمی را به دنباله‌روی از روش‌های غیراخلاقی مانند استخراج، سوزاندن، حمام اسیدی و غیره تطمیع می‌کند. بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، به انتقال غیرقانونی این زباله‌ها به کشورهایی مانند هند، که به‌عنوان مراکز نامناسب بازیافت معروف هستند، دست می‌زنند. همچنین به دلیل شیوه‌های ضعیفی که در طول این فرایند دنبال می‌شوند، سلامت کارگرانی که در جداسازی و دفع زباله‌های EEE مشغول به‌کار هستند، به خطر می‌افتد.

مدیریت زباله‌های الکترونیکی (EWM)، فرایندی برای حذف به شیوه‌ای سازگار با محیط زیست است. گام اول، جمع‌آوری ضایعات الکترونیکی و سپس دسته‌بندی آنها به دو دسته قابل استفاده مجدد و غیرقابل استفاده مجدد است. مواد قابل استفاده مجدد برای فروش مجدد نگهداری می‌شوند، درحالی‌که محصولات غیر قابل استفاده مجدد از طریق چند مرحله تقسیم‌بندی، از هم تفکیک می‌شوند [۲۳،۲۲].

Ethereum یک پلت‌فرم است که کاربران را قادر می‌سازد برنامه‌های غیرمتمرکزی با استفاده از فناوری زنجیره بلوک[۴] ایجاد کنند. Ethereum نه‌تنها برای اجرای معاملات معمولی با استفاده از رمزنگاری مبتنی بر Ethereum مفید است، بلکه باعث ایجاد برنامه‌هایی در زنجیره بلوک با استفاده از زبان کامل تورینگ Solidity می‌شود [۲۶]. زنجیره بلوک، یک لیست رو به رشد از سوابق مرتبط با رمزنگاری است. هر بلوک حاوی رمزنگاری از بلوک قبلی، نشانگر زمان و داده‌های تراکنش است و به‌کمک بازطراحی، در برابر تغییر داده‌ها مقاوم می‌شود.

این کدها، که بر روی پلت‌فرم اتریوم اجرا می‌شوند، قراردادهای هوشمند نامیده می‌شوند. هر گره در شبکه اتریوم، قراردادهای هوشمندانه‌ای را به‌عنوان توافق‌نامه بین کاربران، ایجاد می‌کند؛ ضمن آن‌که وضعیت فعلی قرارداد هوشمند را حفظ و بر اقدامات انجام‌شده طی قرارداد، نظارت می‌کند. زمانی که اطلاعات مورد نیاز توسط یک گره یا قرارداد هوشمند دیگر ارائه می‌شود، کدهای قرارداد را اجرا می‌کند. قراردادهای هوشمند نه‌تنها قوانین و جریمه‌های توافق‌نامه را دقیقاً مانند قرارداد معمولی تعریف می‌کنند، بلکه هر زمان که نیاز باشد، آن را به اجرا می‌گذارند. واضح است که در این ماشین مجازی، این کار بدون نیاز به کارمندان اجرایی خارجی، انجام می‌شود.

با استفاده از قراردادهای هوشمند، می‌توان به شیوه‌ای آسان و بدون دردسر، قوانین را اجرا کرد چون هر دو طرف معامله، ملزم به اجرای این قراردادها هستند، ضمن آن‌که در یک قرارداد هوشمند، اجازه تنظیم تمام کدها، جریمه‌ها و مشوق‌ها برای ایجاد انگیزه، وجود دارد. اگر هر یک از این بخش‌ها، قوانین قرارداد را اجرا نکنند، همانطور که در کد تعریف شده است، اقدامات لازم انجام می‌شود. بدین ترتیب، هر دو طرف درصورت توافق، براساس قراردادهای هوشمند به یکدیگر یا طرف سوم اعتماد می‌کنند.

لازم بذکر است امروزه، قراردادهای هوشمند در بسیاری از زمینه‌های متنوع مانند بیمه، اشتغال، مدیریت زنجیره موجودی و حق کپی‌برداری، مفید شناخته شده است؛ لذا در این مقاله نیز پیشنهاد می‌شود از قراردادهای هوشمند مبتنی بر بلاک‌چین، در EWM نیز استفاده شود.

۴-۶- فرآیندهای بازیافتی مختلف و سازگار با محیط زیست

با توجه به پژوهش‌های انجام شده، در این مقاله دو مورد از جدیدترین و بهترین روش‌های بازیابی زباله‌های الکترونیکی سازگار با محیط زیست ارائه می‌شود.

الف) استفاده از زباله‌های الکترونیکی در مصالح ساختمانی

درحال حاضر، می‌توان ذرات زائد E-waste را به‌عنوان مواد ساختمانی استفاده کرد. استفاده مجدد از مواد زائد الکترونیکی در سیمان، بتن و مصالح ساختمانی دیگر، نه‌تنها به بازیافت آنها کمک می‌کند، بلکه باعث کاهش هزینه‌های تولید سیمان و بتن می‌شود. همچنین دارای مزایایی در کاهش هزینه‌های دفن زباله، تامین انرژی و حفاظت از محیط زیست در برابر اثرات احتمالی آلودگی است. علاوه بر این، احتمالاً دارای برخی مزایای ثانویه در افزایش استحکام فشاری، استحکام کششی و انعطاف‌پذیری درهنگام استفاده از بتن است. از آن‌جایی که زباله‌های الکترونیکی برای جای‌گزینی با دانه‌های ریز، مناسب نیستند، می‌توان از آنها به‌عنوان جای‌گزین دانه‌های درشت استفاده کرد. پیش‌بینی می‌شود استحکام فشاری و استحکام کششی بتنِ حاوی پلاستیک، نسبت به نمونه‌های بتنی متعارف، بیشتر است. با این وجود، هنگامی که درصد پلاستیک زباله الکترونیکی به بیش از۲۰ درصد می‌رسد، استحکام به شدت کاهش می‌یابد [۲۷]. برای آن‌که از زباله‌های الکترونیکی، بدون هیچ تاثیر منفی طولانی مدتی در بتن استفاده شود، از بتن با تراکم ۲۰درصد زباله‌های الکترونیکی به‌جای دانه‌های درشت، استفاده شده و خواص و توانایی قابل قبولی در خواص کششی، کرنشی و مقاومت بتن به وجود آمده است [۲۷].

مدارهای چاپی[5] (PCBs) تقریباً شامل۳۰٪ فلزات و۷۰٪ غیرفلزات هستند. این بوردها شامل مقدار زیادی سیلیکون هستند. در نتیجه، دانه‌بندی خوبی را برای بتن تشکیل می‌دهند. همچنین می‌توانند وزن مرده ساختار را کاهش دهند. با توجه به کمبود دانه‌های درشت برای تهیه بتن، جای‌گزینی جزئی E-waste با دانه‌های جامد پشنهاد می‌شود. برای فیبرهای مدار چاپی به‌صورت بی‌خطر، انجماد همراه با سیمان و روش‌های فشرده‌سازی تحت فشار بالا مورد استفاده قرار گرفته است. انجماد سیمان، یک راه موثر برای بازیافت این فیبرها است که به‌عنوان مواد زائد معمولی قابل دفع است [۲۹]. خواص مکانیکی و دوام نمونه بتنی جای‌گزین‌شده با E-waste درمحدوده ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ مورد مقایسه قرار گرفته و مشاهده شده است که مقاومت فشاری بتن، با ترکیب ضخیم از جای‌گزینی ضایعات الکترونیکی، به‌مقدار ۷/۵ درصد بهینه می‌شود؛ البته، استفاده فراتر از هفت و نیم درصد از زباله‌های الکترونیکی، مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد [۲۸].

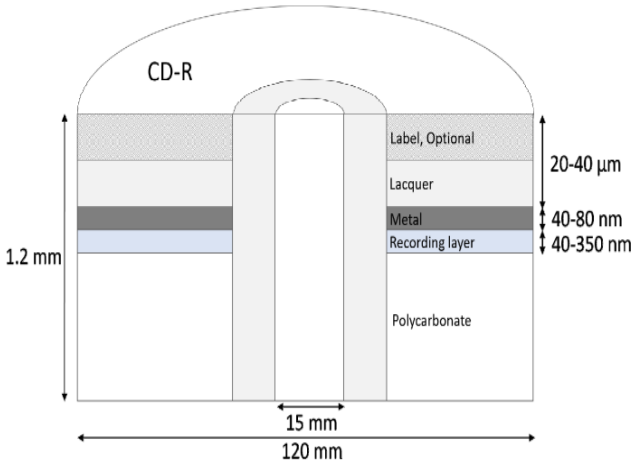
مطالعه دیگری نشان می‌دهد که بازیافت زباله‌های الکترونیکی در بُتن قابل انجام است. در اینجا، نمونه‌های بتونی را با جای‌گزینی E-waste با نسبت۱۰٪، ۲۰٪ و۳۰٪، نسبت به دانه‌های درشت و با نسبت سیمان به آب ۰/۴۵ ساختند و نتیجه گرفتند که استفاده از۲۰٪ ضایعات الکترونیکی در بتن می‌تواند بدون هیچ‌گونه اثر مخرب طولانی مدت و با خواص رضایت‌بخشی، مفید باشد [۱۷].

ب) حذف پلاستیک‌های پوشش داده شده با فلز با استفاده از پالس قدرتی

در این بخش، اثر تخلیه پالس قدرتی بررسی می‌شود [۳۰،۲۹] که در آن حذف فلز از زباله‌های الکترونیکی توسط پالس شوک یا قوس تخلیه [۳۲،۳۱] صورت می‌گیرد. این روش، تقریباً دارای اثرات زیست محیطی نیست؛ زیرا نیاز به حلال‌هایی که بر محیط تاثیر می‌گذارند، ندارد. از سوی دیگر، بازیافت پلاستیک‌های پوشش داده شده با فلزات، نیازمند یک فرایند غیرمقرون به‌صرفه است، بنابراین، محققان در جداسازی فلز کارآمد از پوشش پلاستیکی از پالس قدرت یک ژنراتور قدرت پالس فشرده‌ساز مغناطیسی [MPC-PPG] استفاده نموده‌اند و روند حذف پلاستیک از فلزات را گزارش کرده‌اند [۳۴،۳۳].

به‌عنوان نمونه، یک CD-R یا CD-ROM دارای الکترودهای پلاستیکی پوشش‌یافته با فلز است. پیشرفت جداسازی و زدایش با استفاده از پالس با قدرت ۳۵,۳J/pulse در [۳۴،۳۳] بررسی شده است. به‌تدریج و با افزایش تعداد پالس‌ها، لایه فلزی از بین رفته است. با تعداد ۲۵ تا ۳۰ پالس، لایه فلز از CD-R یا CD-ROM تقریباً بطور کامل حذف شده است؛ هرچند یک پدیده تخریب پیچیده همراه با فرایند جداسازی مشاهده شده است. با این حال، توانایی آشکارسازی دقیق روال جداسازی فلز (مانند اثرات موج تخلیه و شوک) وجود نداشته است.

شکل (۱) ساختار CD-R را نشان می‌دهد که ضخامت و قطر بیرونی آن به‌ترتیب ۱/۲ و ۱۲۰ میلی‌متر است. CD-R از یک بستر پلاستیکی، یک لایه رنگ آلی، یک لایه فلزی و یک لایه محافظ تشکیل شده است که حاوی لایه چاپی (لایه‌های لاک و برچسب) است. مواد لایه فلزی آن از آلیاژ طلا، نقره خالص یا آلیاژ نقره است و بستر پلاستیکی معمولاً از پلی‌کربنات ساخته شده است. لایه حفاظتی از موادی مانند رزین UV ساخته شده است. روش ذخیره داده‌ها، به‌علت تفاوت ساختار CD-R از CD-ROM، متفاوت است. داده‌هایی مانند موسیقی یا اسناد، با سوزاندن لایه رنگ آلی CD-R به‌وسیله لیزر ثبت می‌شوند. رزین فتالوسیانین، نقره و فرمالدئید برای CD-R استفاده می‌شوند. ضخامت اندازه‌گیری‌شده لایه محافظ شامل لایه چاپی ۳۰ میکرومتر و مقدار میدان در محدوده ۱۲ تا ۱۵ کیلوولت/میلی‌متر است [۳۵].

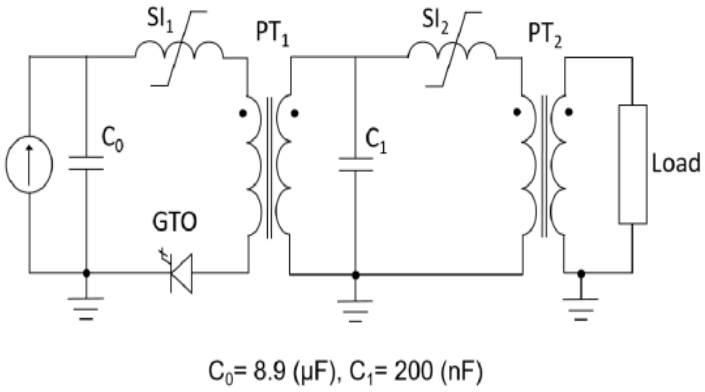


شکل (۱): ساختار CD-R

Fig 1: CD-R configuration

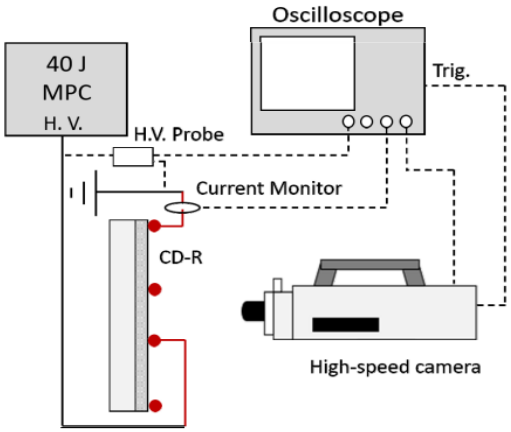
در شکل (۲) مدار اصلی ژنراتور پالس فشرده‌ساز مغناطیسی[۶] (MPC-PPG) با حداکثر انرژی ذخیره‌سازی ۴۰J/pulse را نشان داده می‌شود. MPC-PPG ترکیبی از مدارC-L-C و ترانسفورماتور افزاینده است. انرژی C_0 از طریق C_1، توسط کلیدزنی تریستور GTO و ترانس القایی اشباع شده، به بار منتقل می‌شود. پس از شارژ خازن اصلی C_0 (۸,۹ µF)، تریستور GTO روشن می‌شود. سپس خازن C_1 (۲۰۰ نانو فاراد) ازطریق ترانسفورماتور پالس PT_1 شارژ می‌شود. ترانس القایی SI_1 برای محافظت از کلید و همچنین برای کاهش میزان اتلاف انرژی استفاده می‌شود. از سوی دیگر، SI_2 به‌عنوان یک کلید مغناطیسی استفاده می‌شود. انرژی ذخیره‌شده به C_1 منتقل می‌شود و اجازه می‌دهد تا ولتاژ خروجی درحدود ۹۰ الی ۱۲۰ کیلوولت از طریق PT_2 به بار اعمال شود. MPC-PPG مزایای متعددی از جمله جمع وجور بودن و نیز تنظیم آسان فرکانس و تکرارپذیری فرکانس را داراست.

شکل (۳) اصول مشاهده تخلیه تحت روش استفاده از پالس قدرتی را نشان می‌دهد. پالس با قدرت۳۵ J/pulse از MPC-PPG به الکترودهای حلقوی متمرکز بر روی CD-R اعمال می‌شود. الکترود حلقه درونی به ولتاژ بالا و الکترود بیرونی به زمین متصل می‌شوند. آنها از سیم‌های مسی با قطر ۱/۶ میلی‌متر ساخته شده‌اند و فاصله بین دو الکترود تقریباً ۳۵ میلی‌متر است. ولتاژ بین الکترودها با یک پروب ولتاژ بالا اعمال‌شده و جریان تخلیه با مانیتور مخصوص اندازه‌گیری و نمایش داده شده است.



شکل (۲): مدار اصلی ژنراتور پالس فشرده‌ساز مغناطیسی

Fig 2: The main circuit of magnetic pulse compression-pulsed power generator

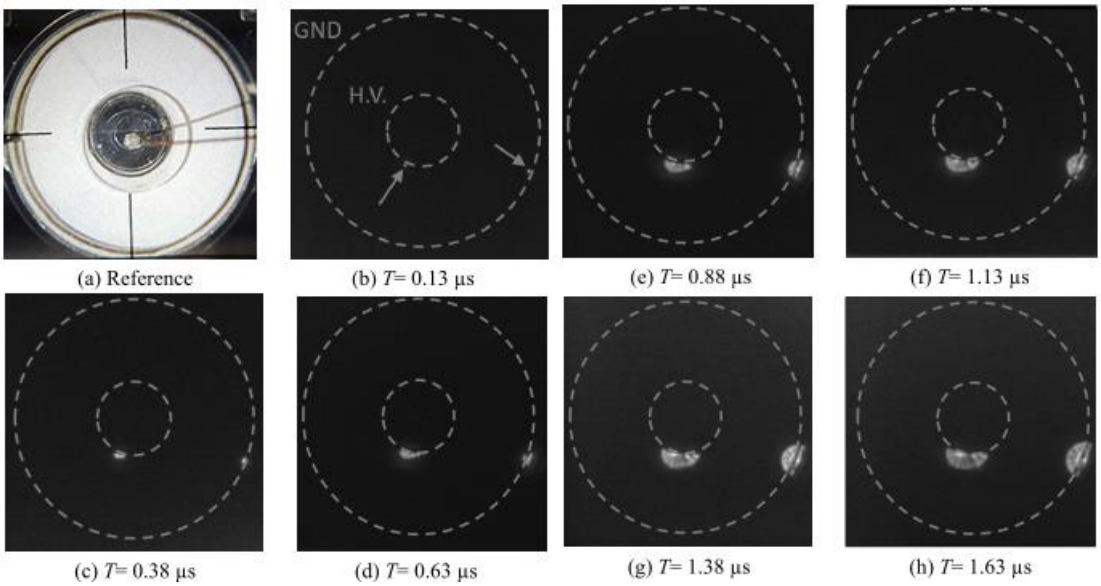


شکل (۳): بلوک مشاهده تخلیه در هنگام حذف فلز [۳۷]

Fig 3: Discharge observation block during metal removal

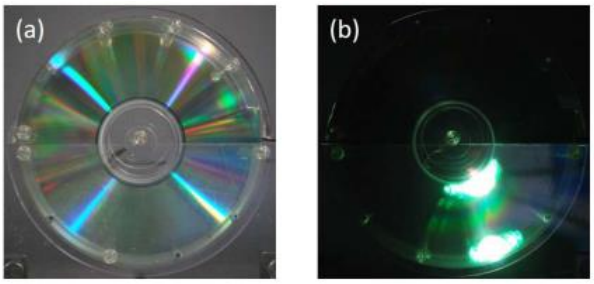
تخلیه به‌وسیله دوربین سرعت بالایی مشاهده شد که حداقل زمان درمعرض قرارگرفتن آن ۵ نانوثانیه، فاصله کانونی آن ۵ نانوثانیه و حداکثر تعداد کادر آن ۱۲+۱۲ فریم است؛ درحالی که CD-R در جهت عمود بر روی میز قرار داده شده است. در این مطالعه، دو نوع لنز دوربین، یکی لنز فاصله کانونی ثابت که می‌تواند تصاویر تمام CD-R را ثبت کند و دیگری لنزهای تلسکوپی، استفاده شد. به‌ترتیب، درمعرض قرارگرفتن و تأخیر در دوربین سرعت بالا بر روی ۱۰ نانوثانیه و ۵۰ نانوثانیه تنظیم شد. دوازده تصویر از تخلیه گرفته شد. از آنجا که نرخ فریم بر Mfps ۴ تنظیم شده است، فاصله زمانی بین تصاویر ۲۵۰ نانومتر است. علاوه بر تهیه عکس‌های هر مرحله، حالت حذف و تخلیه فلز هم با دوربین دیجیتال مشاهده شد و همزمان، طیف انتشار با طیف‌سنج اندازه‌گیری شد [۳۶].

شکل (۴) تصاویر تخلیه را در اولین شات‌ها نشان می‌دهد. شکل (۴-a) یک تصویر ثابت از سامانه و الکترود را قبل از استفاده از پالس قدرت نشان می‌دهد. شکل ۴-b، مربوط به اولین سیگنال راه‌انداز پس از ۰/۱۳ میکرو ثانیه است و شکل‌های (۴-c) الی (۴-h)، مربوط به سیگنال‌های راه‌انداز از شات ۲ تا ۷ است [۳۶]. واضح است که تخلیه، به‌تدریج و به‌صورت دایره‌ای پخش می‌شود و این عمل با انتشار نور شعاعی زیادی همراه است. شکل (۴-g) نشان می‌دهد که انتشار تخلیه تا زمانی‌که جریان به اوج خود برسد، افزایش می‌یابد. مقدار بالای جریان، لایه فلزی را تبخیر می‌کند. تخلیه لایه فلزی در نقطه تماس تخلیه، به شکل گِرد گسترش می‌یابد [۳۶].



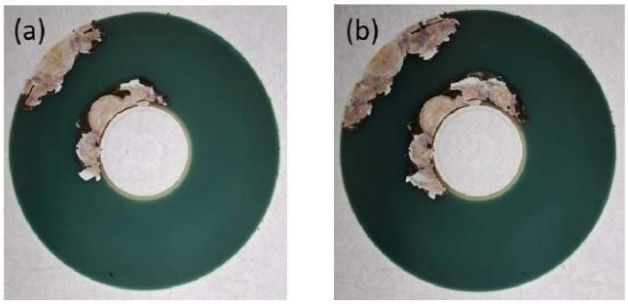
شکل (۴): عکس‌های تخلیه قدرت پالس در هفت شات[۳۷]

Fig 4: Images from seven-pulse power discharge



شکل (۵): تصاویر تخلیه از سمت سوپاپ پلاستیکی CD-R که با دوربین دیجیتالی گرفته شده است:
(a) حالت CD-R قبل از استفاده از پالس، (b) حالت تخلیه در زمانی که جریان به حداکثر رسیده است [۳۷].

Figure (5): Discharge images from CD-R plastic valve taken with digital camera:
(a) CD-R state before using pulse, (b) Discharge state when the current is reached to maximum [37].



شکل (۶): وضعیت CD-R، (a) بعد از دومین شات و (b) بعد از سومین شات

Figure (6): CD-ROM state, (a) after second shot (b) after third shot

شکل (۵-a) وضعیت CD-R را قبل از اعمال پالس قدرت و شکل (۵-b) وضعیت تخلیه وقتی جریان به اوج رسیده است را نشان می‌دهند. با این حال، همان‌طور که در شکل (۵-b) نشان داده شده است، انتشار نور از پشت، منجر به تخلیه همراه با تبخیر لایه فلز است؛ لذا از این روش نیز می‌توان به‌عنوان روشی سازگار برای بازیابی زباله‌های الکترونیکی و الکتریکی استفاده نمود. شکل (۶) لایه پوششی CD-R را قبل و بعد از شات سوم مقایسه می‌کند. جداسازی پلاستیک از فلز، به‌تدریج با افزایش تعداد شات‌ها افزایش یافته است [۳۶]. می‌توان دید که بعد از ۱۰ شات، لایه فلزی در اطراف الکترود ولتاژ بالا حذف شد.

جداسازی لایه فلزی به‌تدریج با افزایش تعداد لکه‌های قهوه‌ای تا زمان جداسازی کامل ادامه داشت. درنتیجه، گرما و تبخیر و امواج شوک به فرآیند جداسازی کمک می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

زباله‌های الکترونیکی، زباله‌هایی رایج نیستند؛ بلکه ضایعات باارزش و خطرناکی هستند که حاوی مقادیر قابل توجهی از منابع فلزی هستند و نباید به‌طور غیرقانونی در هر نقطه‌ای تخلیه شوند. فرایندهای سنتی نیز ممکن است به‌علت آلودگی محیط زیست و هزینه‌های بالا و کارایی کم، نیازمندی‌های صنعت را در آینده برآورده نکنند. استفاده از فرایندهای پاک در بازیافت PCBها، برای اقتصاد و محیط زیست هر کشور بسیار مهم است که باید مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، به‌دلیل پیچیدگی سامانه E-waste، استفاده از فقط یک فناوری، محدودیت دارد و توانایی حل تمام مشکلات را ندارد. در آینده نزدیک، برای بازیافت فلزات، احتمالاً باید از چندین فرایند یا فناوری استفاده شود. هنوز هم استفاده از قراردادهای هوشمند برای مدیریت زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی، مورد تحقیق دقیق و استفاده کاربردی قرار نگرفته است، بنابراین بررسی نحوه استفاده صحیح از مواد زائد الکترونیکی در صنایع مختلف، ضرورت فراوانی خواهد داشت.

سپاسگزاری

از آقای دکتر غضنفر شاهقلیان که در یافتن مراجع، ویرایش ادبی و نشر این مقاله سعی فراوان نموده و درنهایت باتواضع، نام خود را از لیست نویسندگان حذف نمودند، همچنین آقای دکتر امیر بکتاش و آقای مهندس امید شاه‌چراغی که در انجام آزمون‌های پالس قدرت ما را یاری نمودند، صمیمانه سپاسگزاریم.

References

مراجع

[1] C.P. Balde, V. Forti, V. Gray, R. Kuehr, P. Stegmann, "The global e-waste monitor-2017", Quantities, flows and resources", United Nations University, International Telecommunication Union and International Solid Waste Association, 2017.

[2] R. Ganguly, "E-waste management in India- An overview", International Journal of Earth Sciences and Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 574-588, 2016.

[3] P. Pathak, R.R. Srivastava, "Assessment of legislation and practices for the sustainable management of waste electrical and electronic equipment in India", Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 78, pp. 220-232, Oct. 2017 (doi: 10.1016/j.rser.2017.04.062).

[4] P.I. Label, R. OHS compliance engineer, "Directive 2002/95/EC of the European parliament and of the council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment", 2005 (doi: 10.1016/j.eiar.2005.04.001).

[5] E.C. Directive, "Directive 2012/19/EU of the European parliament and of the council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment, WEEE", Official Journal of the European Union, vol. 197, pp. 38-71, 2012.

[6] R. Widmer, H. Oswald-Krapf, D. Sinha-Khetriwal, M. Schnellmann, H. Böni, "Global perspectives on e-waste", Environmental Impact Assessment Review, vol. 25, no. 5, pp. 436-458, July 2005 (doi: 10.1016/j.eiar.2005.04.001).

[7] S. Pramila, M.H. Fulekar, P. Bhawana, "E-waste-A challenge for tomorrow", Research Journal of Recent Sciences, vol. 1, no. 3, pp.86-93, March 2012.

[8] Y.S. Yong, Y.A. Lim, I.M. Ilankoon, "An analysis of electronic waste management strategies and recycling operations in Malaysia: Challenges and future prospects", Journal of Cleaner Production, vol. 224, pp. 151-166, July 2019 (doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.205).

[9] P. Dias ,A.M .Bernardes ,N. Huda, "Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management: An analysis on the Australian e-waste recycling scheme", Journal of cleaner production, vol. 197, pp. 750-764, 2018 (doi: 10.1016/j, jclepro, 2018.06.161).

[10] P. Chancerel, C.E. Meskers, C. Hagelüken, V.S. Rotter, "Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment", Journal of Industrial Ecology , vol. 13, no. 5, pp. 791-810, 2009 (doi: 10.1111/j.1530-9290.2009.00171).

[11] Q.Liu, K.Q. Li, H. Zhao, G. Li, F.Y. Fan, "The global challenge of electronic waste management", Environmental Science and Pollution Research, vol. 16, no. 3, pp. 248-249, 2009.
[12] J. Neira, L. Faveret, M. Fuji, R. Miller, S. Mahdavi, V.D. Blass, "End-of-life management of cell phones in the United States", Master's Thesis, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara 2006 (doi :10. 1109/ISEE.2008.4562849).
[13] B.H. Robinson, "E-waste: an assessment of global production and environmental impacts", Science of the total environment, vol. 408, pp. 2183-191, 2009 (doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.09.044).
[14] A. Kasassi, P. Rakimbei, A. Karagiannidis, A. Zabaniotou, K. Tsiouvaras, A. Nastis, K. Tzafeiropoulou, "Soil contamination by heavy metals: Measurements from a closed unlined landfill", Bio resource Technology, vol. 99, no. 18, pp. 8578-8584, 2008 (doi: 10.1016/j.biortech.2008.04.010).
[15] X. Bi, B.R. Simoneit, Z. Wang, X. Wang, G. Sheng, J. Fu, "The major components of particles emitted during recycling of waste printed circuit boards in a typical e-waste workshop of South China", Atmospheric Environment, vol. 44, no. 35, pp. 4440-4445, No. 2010 (doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.07.040).
[16] J.V. Owens, C. Lambright, B. Kathy, B. Ryan, J.E. Gray, B.K. Gullett, V.S. Wilson, "Identification of estrogenic compounds emitted from the combustion of computer printed circuit boards in electronic waste", Environmental Science & Technology, vol. 41, no. 24, pp. 8506-8511, Nov. 2007.
[17] M. Masuduzzaman, S.K. Amit, Md Alauddin, "Utilization of E-waste in concrete and its environmental impact-A review", Proceeding of the IEEE/ICSCET, pp. 1-4, Mumbai, India, Jan. 2018 (doi :10.1109/ ICSCET.2018.8537301).
[18] V. Ari, "A review of technology of metal recovery from electronic waste", E-Waste in Transition—From Pollution to Resource, 2016 (doi: 10.5772/61569).
[19] J. Cui, E. Forssberg, "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review", Journal of hazardous materials, vol. 99, no. 3, pp. 243-263, May 2003 (doi: 10.1016/S0304-3894(03)00061-X).
[20] J. Li, P. Shrivastava, Z. Gao, H.C. Zhang, "Printed circuit board recycling: a state-of-the-art survey", IEEE Tarns. on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 27, no. 1, pp. 33-42, Jan. 2004 (doi: 10.1109/TEPM. 2004.830501).
[21] N. Gupta, P. Bedi, "E-waste management using block-chain based smart contracts", Proceeding of the IEEE/ICACCI, pp. 915-921, Bangalore, India, Sept. 2018 (doi: 10.1109/ICACCI.2018.8554912).
[22] F. Zhang ,C. Cao , C. Li , Y. Liu , D. Huisingh, "A systematic review of recent developments in disaster waste management", Journal of Cleaner Production, vol. 235, pp. 822-840, Oct. 2019 (doi: 10.1016/j. jclepro.2019.06.229).
[23] R. Sarc, A. Curtis, L. Kandlbauer, K. Khodier, K.E .Lorber, R. Pomberger,"Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management–A review", Waste Management, vol. 95, pp. 476-492, July 2019 (doi: 10.1016/j.wasman.2019.06.035).
[24] R. Ganguly, "E-Waste management in India- An overview", International Journal of Earth Sciences and Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 574-588, 2016.
[25] S. Jagdale, V. Dindkar, R. Yelawe, S. Patil, "Present scenario of E-waste disposal: A Review", International Journal for Science and Advanced Research in Technology, vol. 3, no. 6, pp. 5-9, June 2017.
[26] M. Schluep, C. Hagelueken, R. Kuehr, F. Magalini, C. Maurer, C. Meskers, E. Mueller, F. Wang, "Recycling: from E-waste to resources", United Nations Environment Programmed, pp. 2–10, 2009.
[27] R. Lakshmi, S. Nagan, "Investigations on durability characteristics of E-plastic waste incorporated concrete", Asian Journal of Civil Engineering, vol. 12, no.6, pp. 773-787, 2011.
[28] V.S.Damal, S.S. Londhe, A.B. Mane, "Utilization of electronic waste plastic in concrete", International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 5, no. 4, pp. 38-38, 2015.
[29] C.L. Duan, Z.J. Diao, Y.M. Zhao, W. Huang, "Liberation of valuable materials in waste printed circuit boards", Minerals Engineering, vol. 70, pp. 170–177, 2015 (doi: 10.1016/j.mineng.2014.09.018).
[30] D.J. Hemmert, V.I. Smirnov, "Consumer electronic waste recycling using pulsed power generated shockwaves", Proceeding of the IEEE/PMHVC, pp. 697–699, Atlanta, GA, USA, May 2010. (doi: 10.1109/IPMHVC,2010,5958454).
[31] H. Akiyama, T. Nagashima, T. Namihira, Y. Kato, N. Shimomura, S. Katsuki, T. Hisazumi, "Separation of metal from metal-plated plastic by pulsed power", IEEJ Trans. on Fundamentals and Materials, vol. 125, no. 12, pp. 1006-1010, 2005 (doi: 1541/ieejfms.125.1006).
[32] K. Imasaka, S. Gnapowski, H. Akiyama, "Metal plating removal from insulator substrate using pulsed arc discharge", Journal of Physics: Conference Series, vol. 518, no. 1, pp. 012028, 2014 (doi: 10.1088/1742-6596/518/1/012028).
[33] T. Yamashita, H. Akiyama, T. Sakugawa, S. Hamid, R. Hosseini, "Separation process of plastic and metal from CD-R using pulsed power", Proceeding of the IEEE/IPMHVC, pp. 631-634, San Francisco, CA, USA, July 2016 (doi: 10.1109/IPMHVC.2016.8012846).

[34] T. Yamashita, N. Yoshihara, H. Hosseini, T. Sakugawa, H. Akiyama, "Development of recycling method for CD-ROM using pulsed power", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 6, pp. 3425–3431, Dec. 2017 (doi: 10.1109/TDEI.2017.006820).
[35] H. Nishiyama, T. Fujisawa, K. Kishi, T. Hibino, Y. Arai, K. Kojima, "Three bond technical news - light-curing resins", Three Bond CO, LTD, vol. 44, pp. 1–10, 1995.
[36] M. Akiyama, Z. Yang, S. Gnapowski, S.H.R. Hosseini, H. Akiyama, "Observation of underwater streamer discharges produced by pulsed power using high-speed camera", IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 10, pp. 3215–3220, Oct. 2014 (doi: 10.1109/TPS.2014.2338353).

زیرنویس‌ها:

1. Electronic waste management
2. Cathode ray tube
3. Electric and electronic equipment
4. block chain
5. Printed circuit boards
6. Main circuit of magnetic pulse compression-pulsed power generator