

استفاده از میکروموج‌ها در مدیریت پسماندهای صنعتی

آیلین آقابابایی، لیلا وفاجو*

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده تحصیلات تکمیلی، گروه مهندسی شیمی

پيام نگار: vafajoo@azad.ac.ir

چکیده

هر سال پسماندهای زیادی سالانه در سراسر جهان تولید می‌شود. قسمتی از آن را به عنوان ماده بازیافتی شیمیایی یا منبع انرژی جمع‌آوری و بازیابی می‌کنند و بقیه به روشهای نادرستی دفع و یا سوزانده می‌شود. روش نادرست دفع این پسماندها به علت وجود فلزات، دوده و هیدروکربورهای آروماتیک حلقه‌ای، مشکلات و خطرات زیادی برای محیط زیست پدید می‌آورد. به منظور جلوگیری از آلودگی‌ها و ارائه یک سامانه نو در حمل، ذخیره، دفع و تخریب اجزای خطرناک پسماندها، تحقیقات زیادی انجام شده است. مزایا و بازدهی بالای روش میکروموجی، به علت وسعت عملیات و طرز عمل آن، باعث ترویج این فناوری در مدیریت پسماندها شده است. کاربرد این فرایند در پردازش، کنترل، و بازیافت پسماندهای مشکل ساز از جمله پسماندهای الکترونیکی، پلاستیکی، لجنهای صنعتی و شهری و پسماند صنعت اتومبیل است. در این تحقیق روش میکروموجی و پیرولیز به کمک میکروموج به عنوان روشی موثر و جایگزین روشهای معمول در امر بازیافت پسماند و تولید محصولات با ارزش، بررسی شده است.

کلیدواژه‌ها: میکروموج، بازیافت پسماند، پیرولیز

۱- مقدمه

حجمی و بازده گرمایی، نسبت به روشهای معمول موثرتر است. انرژی میکروموج بخشی از انرژی موجود در طیف الکترومغناطیسی، در محدوده ۳۰۰ مگا هرتز تا ۳۰۰ گیگا هرتز با طول موجی از ۱ متر تا ۱ میلی‌متر است. محدوده بیشتر امواج میکروموج کاربردی بین ۳ تا ۳۰ گیگاهرتز است [۱، ۲]. در حالی که در صنعت این بسامد به ۹۰۰ تا ۲۴۵۰ مگا هرتز هم می‌رسد [۳ و ۴].

کوره‌های میکروموجی که اولین بار در سال ۱۹۵۱ توسط شرکت رایتون^۱ ساخته شدند [۵]. به منظور اجتناب از تداخل امواج میکروموج با امواج رادار و بسامدهای مخابراتی، در طیف ۲/۴۵ گیگا هرتز با طول موج مشابه ۱۲/۲۵ سانتی‌متر و انرژی $10^{-5} \times 10^2$ الکتروولت عمل می‌کنند [۶، ۷].

گرما دادن یکی از رایج ترین فرایندها در صنعت به‌شمار می‌آید که به طور گسترده‌ای برای تغییر خواص شیمیایی و فیزیکی مواد در صنایع غذایی، نساجی و سایر رشته‌های مهندسی کاربرد دارد. فناوری‌های متعددی در زمینه گرمایش الکتریکی در کارند که از جمله می‌توان به روش گرمایش القایی، گرمایش به وسیله پرتو فرسرخ و میکروموج اشاره کرد، که هر کدام بخشی از طیف الکترومغناطیسی را در حرارت دادن بکار می‌گیرند. گرما دادن به روش میکروموجی ابتدا در صنعت لاستیک سازی و صنایع غذایی به کار گرفته شد، اما امروزه به علت بهره‌وری بالای این روش، از آن در بازیافت پسماندها و پردازش فلزات نیز استفاده می‌شود. اگر فرایند میکروموجی به درستی کنترل شود، به علت نحوه گرما دادن

1. Raytheon

به دما، مدت زمان تابش، توان و عمق نفوذ اشاره کرد [۱۲، ۲]. خواص مواد جاذب به دما، رطوبت، چگالی و هندسه مواد بستگی دارد. سازوکارهای زیادی به پاسخ مواد جاذب منجر می‌شوند که از جمله آنها می‌توان به قطبش الکتریکی^۴، قطبش اتمی، رسانش یونی، قطبش دو قطبی^۵ و سازوکار سطحی اشاره کرد. در بسامدهای میکروموجی، قطبش ماکسول و قطبش دو قطبی تنها عواملی اند که از حالت الکترومغناطیسی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شوند [۱۴، ۱۳، ۱۲، ۱].

۲- سازوکار گرمادهی به وسیله میکروموج

به طور کلی، سه نوع سازوکار برای گرم کردن مواد سبک به وسیله انرژی میکروموج وجود دارد. که به طور خلاصه از این قرارند [۱۵]:
سمتگیری مجدد دو قطبی‌ها: وقتی مواد حاوی ترکیبات قطبی در معرض امواج میکروموج قرار می‌گیرند، از طریق این سازوکار گرم می‌شوند. در واقع، هنگام قرار گرفتن در میدان میکروموجی، الکترون‌های هسته از وضعیت تعادل خود خارج می‌شوند، و تشکیل دو قطب می‌دهند. در برخی موارد (مثلاً، آب) دو قطبی بودن به علت توزیع نامتقارن، دائمی است. نظر به گرانش دو قطبی‌ها (دائم یا القایی) به تغییر موضع در میدان الکتریکی متناوب، آرایش مولکولی پیوند شیمیایی آنها پیوسته تغییر می‌کند و نتیجه آن افزایش اصطکاک بین مولکولها و در نهایت تولید گرماست که به صورت افزایش دمای ماده بروز می‌کند.

۱. قطبش سطحی^۴: قطبش در سطح مشترک و در نقاط تماس بین مواد مختلف در سیستم‌های ناهمگن رخ می‌دهد. به علت تفاوت در رسانایی و پایداری دی الکتریک مواد مختلف، قطبش در سطح مواد برقرار می‌شود. انباشتگی بار الکتریکی در فضا (بار پیرامونی) باعث تخریب میدان (زمینه الکتریکی) و از دست دادن دی الکتریک می‌شود که این عامل به آثار گرمایش می‌انجامد.

۲. رسانش الکتریکی: سازوکار رسانش الکتریکی وقتی عمل می‌کند که یک ماده رسانای الکتریکی (رسانا) در معرض تابش جریان الکترومغناطیسی قرار گیرد و جریان الکتریکی وقتی ذرات باردار یا عامل‌های (الکترون و یون‌ها و...) موجود در

واکنش مواد نسبت به گرما، متفاوت است. وقتی مواد مختلف تحت تاثیر بسامدهای متفاوت قرار گیرند، برخی امواج را باز می‌تابانند و برخی نسبت به امواج شفاف‌اند. با توجه به خواص جذب انرژی میکروموج‌ها و اثر متقابل آنها با میدان میکروموجی، مواد به چهار دسته رساناها، نارساها، جاذب‌ها و مغناطیس‌ها طبقه بندی می‌شوند:

۱. **رساناها:** این مواد می‌توانند امواج تابیده (انرژی میکروموج) را بازتابانند. مس، برنج، نقره و آلومینیم رساناهای خوبی محسوب می‌شوند. معمولاً موجبرها^۱ در کوره‌های میکروموجی، از جنس برنج یا آلومینیم ساخته می‌شوند [۸و۶].

۲. **نارساها:** از جمله نارساها می‌توان از تفلون و پلی پروپیلن یاد کرد که اساساً نسبت به امواج میکروموج شفاف‌اند و امواج را به صورت گرما در خود ذخیره نمی‌کنند. در واقع، به مقدار نسبتاً جزئی این امواج را باز می‌تابانند و قسمت بیشترش را از خود عبور می‌دهند. نارساها اغلب در اجاق‌ها و کوره‌های میکروموج به کار برده می‌شوند تا از مواد در مقابل گرما محافظت کنند [۸و۶].

۳. **جاذب‌ها:** این موادی می‌توانند امواج میکروموج را جذب کنند و انرژی را به صورت مستقیم انتقال دهند. توانایی این مواد در جذب انرژی میکروموج به گروه‌های کارکردی^۲ و حجم مولکول مواد بستگی دارد [۸و۶]. این مواد دارای بار الکتریکی کم به صورت دو قطبی‌اند. وقتی این مواد در معرض امواج میکروموجی با میدان نوسانی بالا قرار داده می‌شوند، قطبهای مواد تحت انرژی ۲/۴۵ گیگا هرتزی جایگاه خود را تغییر می‌دهند و در اطراف میدان نوسانی قرار می‌گیرند. قطب‌ها با توجه به این میدان الکتریکی ۲/۵ میلیارد بار در ثانیه جایگاه خود را تغییر می‌دهند [۱۰ و ۹ و ۸ و ۶ و ۳]. حرکت قطبها در این مواد، عامل ایجاد اصطکاک و از بین رفتن انرژی داخلی به صورت گرما می‌شود [۱۱، ۶، ۱].

۴. **مغناطیس‌ها:** موادی مانند فریت‌ها^۳ (هیدروکسید آهن) که به وسیله امواج الکترو مغناطیسی گرم می‌شوند، در این دسته قرار می‌گیرند [۱۲].

از عوامل اصلی و تاثیر گذار امواج میکروموج بر مواد جاذب می‌توان

4. Electronic Polarization
 5. Dipole Polarization
 6. Interfacial or Maxwell-Wagner polarization

1. Wave Guide
 2. Functional Groups
 3. Ferrite

۳. پیرولیز بکمک مایکروویو MP^3 : پیرولیز روشی مناسب در تبدیل پسماندها به مواد قابل استفاده به عنوان منبع انرژی، محسوب می‌شود [۱۷، ۱۸]. پیرولیز معمولاً تحت فشار، در غیاب اکسیژن و در دمای بالای $450^{\circ}C$ اتفاق می‌افتد. در واقع یک تخریب گرمایی در غیاب اکسیژن است که مواد خام را به محصولات مختلف تبدیل می‌کند. از جمله محصولات می‌توان به: محصولات جامد (زغال)، مایع (ترکیباتی با وزن مولکولی سنگین که هنگام تراکم سرد می‌شوند)، و گازها (گازهایی با وزن مولکولی کم) اشاره کرد. در مقایسه با سوزاندن، تجزیه از طریق پیرولیز آلودگی کمتری ایجاد می‌کند (تولید کمتر دی‌اکسیدها)، زیرا فلزات سنگین را در باقی مانده مواد کربن دار، غنی سازی و متمرکز می‌کند که این امر باعث آلودگی کمتری نسبت به سوزاندن می‌شود.

حرارت دادن از طریق میکروموجها یکی از شایع ترین و موثرترین روشها در فرایند پیرولیز است. این روش نه تنها مشکلات و معایب روش تجزیه بر اثر حرارت معمولی مانند گرما دادن تدریجی و ضرورت خرد کردن اولیه را ندارد، بلکه به بهبود کیفیت محصولات نهایی پیرولیز شده و در عین حال به طور چشمگیری به صرفه جویی در زمان و انرژی منجر می‌شود [۸]. پیرولیز از طریق امواج میکروموج روش نسبتاً جدیدی است که شرکت TECH-EN-LTD در منطقه هاینالت انگلستان^۴ آن را ابداع و راه اندازی کرده است. در این روش اجزای پسماند با یک جاذب میکروموج مانند ذرات کربن مخلوط می‌شود؛ ذرات کربن انرژی گرمایی میکروموجی لازم را برای پیرولیز پسماند، جذب و باعث تجزیه پسماند می‌شود، در نتیجه اجزای پسماند در غیاب اکسیژن به ذرات کوچکتری تبدیل می‌شوند و اجزای فرار به صورت محصولات مایع^۵ و یا به صورت محصول گازی^۶ غیر قابل چگالی در می‌آیند [۱۵].

۱. گرم شدن نمونه را می‌توان با بی حرکت ماندن مولکولهای دی‌اکتریک آب که عامل گرم شدن اولیه ماده‌اند، توضیح داد.
۲. با توجه به استفاده از گیرنده‌ها، دما قبل از رسیدن به دمای

مواد تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی خارجی حرکت می‌کنند، تولید می‌شود، به بیان دیگر، این حرکت انگیخته ذرات باردار و الکترون‌ها در مواد باعث تولید انرژی گرمایی می‌شود.

۳. گرم شدن یک ماده هنگام قرار گرفتن در معرض تابش الکترومغناطیسی، به خواص دی‌اکتریک ماده بستگی دارد که تابع دو عامل ثابت دی‌اکتریک و ضریب اتلاف دی‌اکتریک است [۱۵ و ۱۰]. ثابت دی‌اکتریک بیانگر توانایی قطبش یک ماده به وسیله میدان الکتریکی و تعیین مقدار انرژی الکترومغناطیس بازتابیده و جذب شده است، در حالی که ثابت اتلاف دی‌اکتریک، بیانگر کیفیت و بازده تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به حرارت است [۱۵].

۳- روشهای مختلف حرارت دادن مواد به وسیله میکروموج

۱. گرمادهی مستقیم DMH^1 : در این روش، ماده درون یک محفظه قرار داده می‌شود و به طور مستقیم آن را گرم می‌کنند، و انرژی میکروموج را بخش عمده ای از مواد جذب می‌کند و بخش درونی مواد به علت قابلیت گسیل و تابش نسبت به بخش بیرونی، زودتر گرم می‌شود. بنابراین، در اغلب موارد یک ماده مقاوم و شفاف نسبت به انرژی میکروموجی در اطراف نمونه قرار می‌دهند تا از گرا دیان گرمایی به علت از دست دادن گرما در سطح نمونه جلوگیری کنند [۱۶، ۱۲].

۲. گرمادهی ترکیبی MHH^2 : در این روش ظرف حاوی نمونه چنان ساخته شده که قدرت جذب بالایی داشته و در برابر از دست دادن دی‌اکتریک مقاوم باشد. انرژی میکروموجی در این حالت وارد محفظه می‌شود بدون آنکه جذبی صورت بگیرد (یا به مقدار خیلی کم جذب صورت گیرد) جاذب به شدت گرم می‌شود و گرما را به نمونه بازمی‌تاباند و ماده مقاوم انرژی، گرما را در خود حفظ می‌کند. روش گرمادهی ترکیبی روش موثری برای پردازش موادی است که در دمای اتاق نسبت به انرژی میکروموج شفاف اند ولی در دماهای بالا با تغییر خواص دی‌اکتریک به عنوان جاذب عمل می‌کنند [۱۶، ۱۲].

3. Microwave Pyrolysis
4. Hainault. Uk
5. Pyrolysis Oil
6. Pyrolysis Gases

1. Direct Microwave Heating
2. Microwave Hybrid Heating

۴- بازیافت فلز از لجن های صنعتی

برای استخراج فلزات از لجن های صنعتی معمولاً از روش میکروموج پیرولیز استفاده می شود. از مزایای این روش می توان به صرف مدت زمان کوتاه و انرژی کم و همچنین به کاهش حجم تا بیشتر از ۸۰٪ اشاره کرد. در این روش برای آنکه لجن بتواند به دمای بالایی (۹۰۰°C) برسد، ابتدا پسماند مربوطه را با یک جاذب میکروموج (مانند زغال چوب) مخلوط می کنند [۲۲،۶]. همچنین، از انرژی میکروموج همراه با کیتوزان^۳ برای تثبیت مس در لجنهای صنعتی استفاده می شود [۲۳].

یکی دیگر از روشهایی که برای استخراج فلزات از لجن های صنعتی، استفاده می شود، روش تی-سی-ال-پی^۴ (استخراج ترکیبات سمی (TCLP)) است. این فرایند امروزه به عنوان روشی برای بازیابی فلزات سنگین از پسماندهای آلوده شناخته می شود. در این فرایند ۱۸ ساعت برای استخراج فلزات و فرایند لیچینگ، زمان لازم است. لجن باید به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰°C خشک شود. برای سرعت دادن به استخراج فلزات از رسوبها از فرایند میکروموج استفاده می کنند. روش استخراج متوالی با استفاده از حرارت میکروموج برای بهبود روند بازیافت فلزات در هر مرحله به کار گرفته می شود [۲۴]. KUO و همکارانش در سال ۲۰۰۵ تحقیقاتی مبنی بر جداسازی و استخراج مس از پسماند لجن شهری ارائه دادند. بنابر گزارشها، روش میکروموجی + استخراج با اسید^۵ برای جداسازی مس از این پسماند موثر است. از عوامل موثر می توان غلظت اسید، نسبت جامد به مایع (S/L) و مدت زمان استخراج را برشمرد. که افزایش توان انرژی میکروموج، کم کردن نسبت S/L و استفاده از جاذب کربن برای تسریع امواج میکروموج، باعث افزایش بازدهی استخراج مس در حدود ۸۰٪ در مدت زمان ۱۰ دقیقه می شود [۲۵،۲۶].

۵- بازیافت فلزات از پسماند اتومبیل

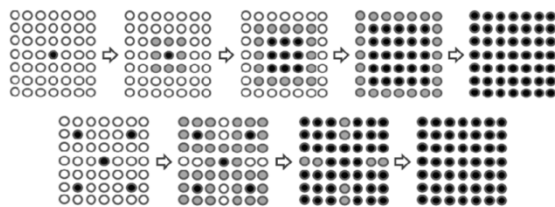
بیشتر ضایعات خودروها از طریق فرایند میکروموج پیرولیز تجزیه و بازیافت می شود. امروزه، تنها ۷۵٪ از وسایل نقلیه در کشورهای اروپایی بازیافت می شوند و ۲۵٪ باقی مانده، ای-سی-ار^۶ (ضایعات

پیرولیز به ثبات یا شرایط پایا می رسد.

۳. دما با توجه به مقدار جرم از دست داده شده به سرعت افزایش می یابد؛ در این حال معمولاً یک نقطه خمش^۱ ظاهر می شود.

۴. تعادل گرمایی برقرار می شود که به گیرنده بستگی دارد.

در مرحله اول، تنها گیرنده میکروموج اضافه شده، قادر به جذب میکروموج و تولید گرماسست که اجازه می دهد ذرات در نزدیکی مواد از طریق روشهای مرسوم (همرفت/رسانش/تابش) گرم شوند. سپس حذف مواد فرار زغال^۲ تولید می کند که به عنوان جاذب میکروموج عمل می کند، بنابراین فرایند پیرولیز می تواند ادامه پیدا کند. در شکل (۱) مراحل مختلف فرایند پیرولیز در مواد توسط گیرنده های میکروموج را مشاهده می کنید. نقطه های سفید نشانه مواد، نقطه های سیاه نماینگر گیرنده های میکروموج و نقطه های خاکستری فرایند و پیدایش گیرنده های میکروموج را نشان می دهند [۸].



شکل ۱. مراحل مختلف فرایند پیرولیز [۸]

از مزایای استفاده از این روش می توان به: ۱. گرمایش انتخابی؛ ۲. بهره گیری مستقیم از مواد خام در ابعاد بزرگ؛ ۳. پردازش ضایعات ناهمگن؛ ۴. کاهش ضایعات و بهبود مواد؛ ۵. تولید محصولات با کیفیت بهتر؛ ۶. تولید محصولات و مواد جامد؛ ۷. افزایش واکنش های شیمیایی؛ ۸. صرفه جویی در مصرف انرژی؛ ۹. صرفه جویی در هزینه های کلی؛ ۱۰. بهبود کنترل فرایند؛ ۱۱. توانایی استفاده از یک منبع برق؛ ۱۲. کنترل از راه دور و قابلیت انعطاف؛ ۱۳. قابل حمل کردن تجهیزات و فرایند؛ ۱۴. کاهش مخاطرات برای انسان و محیط زیست، اشاره کرد [۸،۲۰،۲۱].

در ادامه، تحقیقاتی را که در زمینه میکروموج و میکروموج پیرولیز انجام یافته است، بررسی کنیم:

3. Chitosan
4. Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP)
5. MW+Acid Extraction
6. Auto Shredder Resides (ASR)

1. FLEX
2. Char

گرفته شده) می‌توان درصد بیشتر این فلزات را از زغال حاصل، استخراج کرد. امروزه این فرایند به علت برخورداری از پتانسیل زیاد برای بازیافت مواد باارزشی چون هیدروکربن‌های گازی، اولفین سبک و روغن مایع هیدروکربن‌دار، حاوی مشتقات بنزن و بی-تی-ایکس^۹ از پسماندهای روغن موتور، روشی موثر و کارآمد محسوب می‌شود [۳۱ و ۳۰ و ۲۸ و ۱۵].

۶- بازیافت پسماندهای پلاستیکی

زباله‌های پلاستیکی^{۱۰} از یک سو برای محیط زیست بسیار زیانبارند و از سوی دیگر به عنوان ماده خام ثانویه از پتانسیل زیادی برخوردارند. در طی ۷۰ سال گذشته، صنعت پلاستیک در زمینه تولید بسپارهای صنعتی با پلی اتیلین^{۱۱}، پلی پروپیلین^{۱۲}، پلی استارین^{۱۳}، پلی اتیلین ترفنالات^{۱۴}، پلی ونیل الکل^{۱۵} و پلی ونیل کلراید^{۱۶} رشد چشمگیری داشته است [۸ و ۳].

با توجه به افزایش روز افزون جمعیت، مقدار تولید زباله‌های پلاستیکی افزایش یافته که با توجه به ساختار غیر قابل تجزیه این نوع زباله‌ها، دفع آنها بسیار مشکل آفرین شده است. در مقایسه با روش‌های متداول بازیافت پلاستیک، روش میکروموج پیرولیز روشی مفید و سازگار با محیط زیست است که در این روش هیدروکربن‌های موجود در بسپارها از طریق تجزیه گرمایی، سوخته‌های گازی و مایع تولید می‌کنند. فناوری میکروموج پیرولیز برای پردازش ضایعات پلاستیک برای اولین بار در شرکت Tech-en LTD در انگلستان راه اندازی شد [۳۲ و ۳]. این فرایند شامل مخلوط کردن زباله‌هایی حاوی پلاستیک‌هایی است که در برابر تابش میکروموج بسیار شفاف‌اند. در این فرایند از یک جاذب بسیار قوی مانند ذرات کربن نیز استفاده می‌شود. دمای کربن ظرف چند دقیقه در میدان انرژی میکروموج به ۱۰۰۰ °C می‌رسد و انرژی میکروموج از طریق رسانش به پلاستک خرد شده منتقل می‌شود [۳۳ و ۸]. همچنین، از فلز آهن به عنوان گیرنده برای تولید هیدروکربن در فرایند میکروموج پیرولیز استفاده می‌شود [۳۴ و ۸].

خرد شده حاصل از پسماند اتومبیل)، نامیده می‌شوند، این مواد در گورستانهای زباله روی هم انباشته می‌شوند. ای - سی - ار ماده جامد و بسیار ناهمگن، شامل فلزات، پلاستیک، شیشه، و پارچه..... و نیز شامل ترکیبات خطرناک^۱ PCB (تخته مدار چاپی)، کادمیم، سرب و جز آنهاست [۸، ۳].

دونج^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ طی تحقیقات خود به دانش جدیدی در مورد تجزیه پسماندهای ای - سی - ار و پسماندهای مخلوط مشابه از جمله زباله‌های الکترونیکی، کابل‌ها، لوازم خانگی، لاستیک خودرو، پسماندهای باقی مانده از پالایشگاههای نفت و پتروشیمی، دست یافته‌اند. آنان به این نتیجه رسیدند که استفاده از فرایند میکروموج پیرولیز و گازسازی^۳ در دمای بالا، برای تجزیه این نوع زباله‌ها مفید است. هدف از این کار، افزایش تبدیل ای - سی - ار به مواد آلی و محصولات با ارزشی چون کربن سیاه، سوخت گازی و مایع است، محصولات جامد و مایع حاصل را نیز می‌توان از طریق فرایند HTSG^۴ (گازسازی در دمای بالا)، به محصولات گازی تبدیل کرد [۲۷ و ۸].

روغن موتور سوخته^۵ یکی دیگر از پسماندهای خطرناک برای محیط محیط زیست به شمار می‌آید که با توجه به حضور عناصر نامطلوب مانند دوده، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه ای^۶ و ناخالصی‌ها، مواد افزودنی مانند پارافین کلرینه شده و بی فنل‌ها^۷، تجزیه آنها دشوار و خطرناک است. فرایندهای امروزی که برای تجزیه پسماندهای روغن موتور به کار گرفته می‌شوند، مانند سوزاندن و تصفیه در حضور هیدروژن (هیدروژناسیون)^۸ به علت آلودگی فراوان حاصل از دفع لجن، منسوخ شده است. تحقیقات نشان می‌دهند که فرایند میکروموج پیرولیز برای بازیافت و تجزیه پسماندهای روغن موتور مناسب و مفید است [۲۹، ۲۸ و ۸]. در روغن موتور کارکرده فلزاتی از جمله Pb, Fe, Cu, Ni, V, Cd وجود دارد که در اثر فرایند میکروموج پیرولیز در دمای ۶۰۰ °C تمام این فلزات در زغال حاصل از فرایند انباشته شده که بعد از غربال کردن و جداسازی ذرات کربن (که به عنوان جاذب انرژی به کار

9. BTX
10. PSW (Plastic Solid Waste)
11. Polyethylene
12. Polypropylene
13. Polystyrene
14. Polyethylene Terephthalate
15. Polyvinyl Alcohol
16. Polyvinyl Chloride

1. Printed Circuit Board
2. Donj
3. Gasification
4. High Temperature Agent Gasification
5. WAO (waste Engine Oil)
6. PAHS
7. PCBS
8. Hydro Heating

اطمینان بیشتری در گورستانهای زباله دفع و یا از آنها در ساخت بتن، آسفالت، آجر و سفال بهره برد [۳۵].

ویکس^۵ در سال ۱۹۹۵ فرایندی برای پردازش و بازیافت فلزات از این گونه پسماندها، ارائه داد، فرایندی متشکل از دو سیستم میکروموج پی در پی شامل ۲ محفظه به هم پیوسته است. در محفظه اول حجم زباله‌ها تا ۵۰٪ کاهش پیدا کرده و به طور موثر تبدیل به محصولات شیشه‌ای و فلزی می‌شوند که براحتی از هم جدا می‌شوند و در محفظه دوم به میزان چشمگیری از مقدار مواد خطرناک کاسته می‌شود [۸]. سان^۶ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ در مورد آثار پیرولیز بر پسماندهای الکترونیکی و خصوصیات مواد تحت تابش میکروموج تحقیقاتی انجام دادند. آزمایشهای آنها نشان داد که بیش از ۷۰٪ زباله‌های الکترونیکی از طریق پیرولیز تجزیه و ۸۰٪ گاز حاصل از آن، شامل CO، CH₄، H₂ و مانند آنهاست. علاوه بر این، پس از مرحله پیرولیز می‌توان از ضایعات شیشه تولیدی برای محصور کردن و قطع تحرک عناصر خطرناک باقی مانده در پسماند بهره گرفت. همچنین، محصول فلزی حاصل، این امکان را فراهم می‌آورد که فلزات با ارزش و گرانبها به راحتی بازیافت شوند [۳۶ و ۸]. در سال ۱۹۹۸ ویکس و جورج^۷ روشی برای بازیافت فلزات از پسماندهای الکترونیکی به روش میکروموجی ارائه داده‌اند. این روش برای پسماندهایی چون صفحه مدار، لامپ پرتو کاتی، لامپ خلا و ترانزیستورها، کابل‌ها، نمایشگر تلویزیون، نمایشگرهای رایانه، کنترل از راه دور^۸ و ماشین‌های حساب و ... به کار می‌رود. در سال ۲۰۱۱ به این روش برای بازیافت پسماندهای کارخانه سوانا^۹ استفاده شد [۳۷، ۳۵، ۱]. میکروموج، دما را به دقت و بطور منظم کنترل و از افزایش بی‌رویه دما جلوگیری و دما را به تدریج و به طور مناسب افزایش می‌دهد و پسماندهای مورد نظر را تجزیه می‌کند. حساسه‌ها^{۱۰} به عنوان عامل کمکی در فرایند حرارت به کار برده می‌شوند. حساسه‌ها فلزاتی‌اند که امواج میکروموج را به سرعت جذب می‌کنند و از این امواج برای گرم کردن فلزات مجاور که به دلایلی نسبت به درجه دمای میکروموج واکنش کندتری بروز می‌دهند، استفاده می‌کنند. حساسه‌ها ترجیحاً حاوی موادی‌اند دارای

بالافکس^۱ و چیس^۲ در سال ۲۰۰۱ روش جدیدی بر پایه میکروموج میکروموج پیرولیز به منظور تخریب و تجزیه پلی اتیلن و ورقه‌های آلومینیم/بسیار (پوشش‌های خمیر دندان) با چگالی بالا و با بهره‌گیری از یک دستگاه نیمه پیوسته، ارائه کردند. درصد بازیافت و کیفیت آلومینیم در این روش در مقایسه با روشهای قبلی و معمول بسیار بیشتر بوده که با پی گرفتن این روش، مواد آلی سنگین به هیدروکربنهای گاز و مایع تبدیل می‌شوند [۳۳ و ۲۸ و ۱۵ و ۸ و ۳].

۷- بازیافت پسماندهای الکترونیکی

دفع زباله‌های الکترونیکی و تجهیزات الکترونیکی مساله‌ای مهم در سراسر جهان است. امروزه، بسیاری از پسماندهای الکترونیکی شامل مدارهای الکترونیکی‌اند. لازم است که این نوع پسماندها چنان تجزیه شوند که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشند و خطری برای محیط زیست نداشته باشند. انباشته کردن این پسماندها در گورستانهای زباله^۳ خطرات و زیان‌های زیادی در بر دارد، از جمله زیان‌هایی که می‌توان از آنها یاد کرد، حجم زیاد این پسماندهاست که پیوسته افزایش می‌یابد و باعث پر شدن گورستانهای زباله می‌شود. از سوی دیگر، وجود فلزات سنگین و مواد خطرناک در این پسماندها در صورت نشت، تهدید جدی برای محیط زیست و منابع آب محسوب می‌شوند [۸]. به همین علت، فرایندهای زیادی برای پایداری و محصور کردن عناصر خطرناک پسماندهای الکترونیکی صورت گرفته است که از مهمترین و تأثیرگذارترین آنها می‌توان به فرایند شیشه‌سازی^۴ اشاره کرد. در این فرایند پسماند همراه با ترکیبات شیشه (سیلیکات) که غالباً در پسماندهای وسایل الکترونیکی یافت می‌شود، در درون گدازنده حرارت داده می‌شود تا کاملاً ذوب شود. سرانجام، شیشه تمام پسماند را چنان در خود محبوس می‌کند که پس از سرد شدن ماده حاصل، تا مدت‌ها امکان جداسازی و نشت پسماند وجود ندارد. اگر پسماند دارای سیلیکات و یا ترکیبات شیشه نباشد، به پسماند یکی از ترکیبات، بروسیلیکات، کوارتز، آلومینا، بور، ژرمانیم اکسید و یا پنتا اکسید فسفر اضافه می‌کنند تا عمل شیشه‌ای شدن انجام شود. در واقع، با این عمل می‌توان پس از جداسازی فلزات با ارزش، پسماند حاصل را با

5. Wicks
6. Sung
7. Gorge- g
8. Remote Controls
9. Savannah
10. Suseptors

1. Palafox
2. Chase
3. Landfill
4. Vitrification

از جدا شدن، بار دیگر پسماند را به صورت $T_b \gg T_3 < T_c$ حرارت می‌دهند و مرحله به مرحله فلزات را با توجه به نقطه ذوبشان از پسماند استخراج می‌کنند [۳۵، ۳۷]. کیو^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ روشهای متعددی برای استخراج فلزات از صفحه مدارها را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش میکروموجی + استخراج با اسید، برای استخراج فلزات، بخصوص مس، از این پسماند، روشی موثر است، به طوری که، مدت زمان تابش، توان میکروموج، نوع و غلظت اسید، از پارامترهای مهم در این روش به شمار می‌آیند و با افزایش توان میکروموج در مدت زمان کوتاه، بازدهی استخراج مس به حدود ۹۳٪ می‌رسد. کیو با اطمینان خاطر بیان کرد که این روش بالاترین بازدهی استخراج را در مدت زمان کم نسبت به روشهای معمول دارد [۲۵، ۳۸]. خلاصه تحقیقات و شرایط عملیاتی آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

خواص جفت شدگی خوب دی الکتریک. در واقع وقتی حساسه‌ها را حرارت می‌دهند، انرژی میکروموج را جذب می‌کنند و وقتی این حرارت افزایش یافت، آن را می‌تابانند تا تمامی فلزات موجود در پسماند را ذوب کنند. در این روش از کاربید سیلیسیم (SiC)^۱ به عنوان حساسه استفاده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، از مزایای استفاده از میکروموج در این روش، کنترل دمای پسماندها است. زیرا دمای بالا باعث سوختن مواد و انتشار ذرات بسیار آلوده در فضا می‌شود. اساس این روش، گرما دادن بر حسب نقطه ذوب فلزات است. بیشتر پسماندها دارای ترکیبات فلزی با نقطه ذوب متفاوتند ($T_a < T_b < T_n$). برای بازیابی فلزات به این روش، باید پایین‌ترین نقطه ذوب در دست باشد (T_a). در این حالت، با دمای T_3 پسماند را حرارت می‌دهند ($T_a \gg T_3 < T_b$) و تا زمانی که این دسته از فلزات از پسماند جدا شوند، این کار ادامه پیدا می‌کند. بعد

جدول ۱. تحقیقات انجام شده بر روی بازیافت پسماندهای مختلف با استفاده از امواج میکروموج

فرایند	فلز قابل بازیافت	پسماند	مقیاس فرایند	شرایط عملیاتی		درصد بازیافت	ماخذ
میکروموج پیرولیز	Cd, V, Ni, Pb, Cu, Fe	اتومبیل (روغن سوخته)	آزمایشگاهی	دما $600 \leq C$	توان مصرفی ۷/۵ KW	N/A	[۱۵]
میکروموج + استخراج ترکیبات سمی	Cu, As, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr	لجنهای صنعتی	آزمایشگاهی	$50 - 70 \text{ } ^\circ\text{C}$	۳۰۰-۵۰۰ W	۱۰-۱۵ دقیقه $\cong 100\%$	[۲۲]
میکروموج + استخراج با اسید	Cu	پسماند الکترونیکی	آزمایشگاهی	S/L ۱/۶	توان مصرفی ۸۰۰ W	زمان فرایند ۳۰ دقیقه ۹۳٪	[۳۸]
میکروموج + استخراج با اسید	Cu	لجن شهری	آزمایشگاهی	۱/۶	N/A	۱۰ دقیقه ۸۰٪	[۲۶]
میکروموج پیرولیز	Al	پسماند پلاستیکی	آزمایشگاهی	دما 600 °C	بستری از کربن	۱۰۰٪	[۳۲]
میکروموج	فلزات مختلف	پسماند الکترونیکی	آزمایشگاهی	دما: بر حسب نقطه ذوب فلزات (°C) $T_1 = 300 - 800$ $= T_2 1000 - 1550$		N/A	[۳۵]

- enhancing digestibility of waste activated sludge", *Water Research*, 41(11): 2457–2466. (2007)
- [5] Oespchuck, J. M., "A history of microwave-heating applications", *IEEE Transactions. Microwave Theory Techniques*, 32(9): 1200–1224. (1984)
- [6] Ting-Nien, Wu., "Environmental Perspectives of Microwave Applications as Remedial Alternatives—Review", *Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management*, 12(2)2: 102-112. (2008)
- [7] Jacob, J., Chia, L. H. L., Boey, F. Y. C., "Review—Thermal and nonthermal interaction of microwave radiation with materials", *Material Science*. 30: 5321–5327. (1995)
- [8] Fernández, Y., Arenillas, A., Menéndez, Á. J., "Microwave Heating Applied to Pyrolysis", *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*, 31:723-752. (2011)
- [9] Vorster, W., Rowson, N. A., Kingman, S. W., "The effect of microwave radiation upon the processing of Neves Corvo copper ore", *International Journal of Mineral Processing*, 63(1):29–44. (2001)
- [10] Sobh, A., chaouki, J., "Microwave-Assisted biorefinery", *Chemical engineering transactions*, 19: 25-30. (2010)
- [11] Haque, K. E., "Microwave energy for mineral treatment processes—A brief review", *International Journal of mineral processing*, 57(1): 1–24. (1999)
- [12] Gupta, M., Leong, W. W., Eugene, "Microwaves and Metals", *John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd*, (2007)
- [13] Metaxas, A. C., Meredith, R. J., "Industrial microwave heating", Chap. 10, *Peregrinus*, London. (1993)
- [14] Thostenson, E. T., Chou, T. W., "Microwave processing: fundamentals and applications", *Composites Part A*, 30(9): 1055-1071. (1999)
- [15] Lam, S. S., Chase, H. A., "A Review on Waste to Energy Processes Using Microwave Pyrolysis", *Energies*, 5(10): 4209-4232. (2012)
- [16] Clark, D. E., Folz, D. C., West, J. K., "Processing materials with microwave energy", *Materials Science and Engineering*, A287 (2): 153–158. (2000)
- [17] Carlson, T. R., Cheng, Y. T., Jae, J., Huber, G. W., "Production of green aromatics and olefins by catalytic fast pyrolysis of wood sawdust", *Energy Environmental Science*, 4(1):145–161. (2011)
- [18] Bridgwater, A. V., "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading", *Biomass Bioenergy*, 38: 68–94. (2012)
- [19] Zhao, X., Song, Z., Liu, H., "Microwave pyrolysis of corn stalk bale: A promising method for direct utilization of large-sized biomass and syngas production", *Analytical and Applied Pyrolysis*, 89 (1): 87-94. (2010)

تا به امروز تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بازافت پسماندهای مختلف به کمک امواج میکروموج صورت گرفته، اما علیرغم تحقیقات گسترده و جامع در این زمینه، رشد این فرایند در صنعت با مشکلات زیادی روبرو بوده است. استنباط می‌شود که فقدان اطلاعات کافی برای تعیین خواص دی الکتریک پسماندها و نیاز به چند زمینه تخصصی برای طراحی و توسعه واحدهای مربوطه برای بازافت و عدم اطمینان در مورد هزینه‌های واقعی از جمله مشکلاتی‌اند که باعث صنعتی نشدن این فرایند شده است.

۸- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، معرفی روش میکروموج به عنوان روشی موثر و کارآمد در پردازش پسماندهای مختلف و بازافت فلزات و عناصر با ارزش از آنهاست. گرمادهی با میکروموج به علت نحوه گرمادهی حجمی و بهبود بازده گرمایی نسبت به روشهای معمول کارآمدتر است. از بررسی تحقیقات انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که گرمادهی با میکروموج به علت گزینش‌پذیری پر دامنه، مدت زمان کوتاه گرمادهی، کنترل بهتر فرایند، و عدم تماس مستقیم با مواد نسبت به روشهای مرسوم، در امر بازافت فلزات از پسماندها، روشی موثر به‌شمار می‌آید. گرچه در چند دهه اخیر بسیاری از پژوهشگران به استفاده از این امواج توجه ویژه داشته‌اند، اما هنوز این فرایند جایگاه خود را به عنوان روشی برای بازافت فلزات (بخصوص در ایران) نیافته است. دلایل متعددی برای این امر وجود دارد که مهم ترین آنها عدم اطلاع کافی از این زمینه است.

مراجع

- [1] Remya, N., Lin, J. G., "Current status of microwave application in wastewater treatment—A review", *Chemical Engineering*, 166(3): 797–813. (2011)
- [2] Jang, J. H., Ahn, J. H., "Evaluation of a microwave-heating anaerobic digester treating municipal secondary sludge". *Environmental Technology*, 34(7): 885-889. (2013)
- [3] Appleton, T. J., Colder, R. I., Kingman, S. W., Lowndes, I. S., Read, A. G., "Microwave technology for Energy-efficient processing of waste", *Applied Energy*, 81(1): 85–113. (2005)
- [4] Eskicioglu, C., Terzian, N., Kennedy, K. J., Droste, R. L., Hamoda, M., "Athermal microwave effects for

- [20] Fantini, M., Zuliani, V., Spotti, M. A., Rivara, M., "Microwave assisted efficient synthesis of imidazole-based privileged structures", *Combinatorial Chemistry*, 12(1): 181–185. (2010)
- [21] Schmink, J. R., Leadbeater, N. E., "Probing microwave effects using Raman spectroscopy", *Organic Biomolecular Chemistry*, 7(18): 3842–3846. (2009)
- [22] Menendez, J. A., Inguanzo M., Pis, J. J., "Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge", *Water Research*, 36(13): 3261–3264. (2002)
- [23] Jothiramalingam, R., Lo, S. L., Phanthi, L. A., "Chitosan-type bioadditive- modified electronic industry waste sludge for heavy metal stabilization with assistance of microwave heating", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(6): 2557–2561. (2010)
- [24] Ying, Z., Jianlei, Z., Faju, X., "Application of microwave extractions for the assessment of available heavy metals from sewage sludges using the Toxicity Characteristic Leaching Procedure", 2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications IPCBEE ., 17: 6-11. (2011)
- [25] Mudhoo, A., Sharma, S. K., "Microwave Irradiation Technology In Waste Sludge And Wastewater Treatment Research", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(11): 999–1066. (2011)
- [26] Kuo, C. Y., Wu, C. H., Lo, S. L., "Removal of copper from industrial sludge by traditional and microwave acid extraction", *Hazardous Materials*, 120(1-3): 249–256. (2005)
- [27] Donaj, P., Yang, W., Blasiak, W., Forsgren, C., "Recycling of automobile shredder residue with a microwave pyrolysis combined with high temperature steam gasification", *Hazardous Materials*, 182(1-3): 80–89. (2010)
- [28] Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., Basak, T., "Microwave Material Processing—A Review", *American Institute of Chemical Engineers (AIChE)*, 58(2):330-363. February (2012)
- [29] Kim, S. S., Chun, B. H., Kim, S. H., "Non-isothermal pyrolysis of waste automobile lubricating oil in a stirred batch reactor", *Chemical Engineering*, 93(3):225-231. (2003)
- [30] Lam, S. S., Russell, A. D., Chase, H. A., "Pyrolysis using microwave heating: A sustainable process for recycling used car engine oil", *Industrial Engineering Chemistry Research*, 49(21): 10845–10851. (2010)
- [31] Lam, S. S., Russell, A. D., Chase, H. A., "Microwave pyrolysis, a novel process for recycling waste automotive engine oil", *Energy*, 35(7):2985–2991. (2010)
- [32] Ludlow-Palafox, C., Chase, H. A., "Wave goodbye to plastic wastes", *Chemical Engineering*, 717(1): 28-29. (2001)
- [33] Ludlow-Palafox, C., Chase, H. A., "Microwave induced pyrolysis of plastic wastes", *Industrial and Engineering Chemical Research*, 40(22): 4749-4756 .(2001)
- [34] Hussain, Z., Khan, K. M., Hussain, K., "Microwave-metal interaction pyrolysis of polystyrene", *Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(1): 39-43. (2010)
- [35] Wicks, G. G., "Method for recovering metals from waste", Patent number 5843287. (1998)
- [36] Sun, J., Wang, W., Ma, C., Dong, Y., "Study on pyrolysis characteristics of electronic waste", *Proceedings of the international conference Chemical Biological and Environmental Engineering*, 13-16. (2009)
- [37] Schulz, R. L., Wicks, G. G., Folz, D. C., Clark, D. E., "Overview of Hybrid Microwave Technology", *South Carolina Academy of Science*, 9(1): 25-29. (2011)
- [38] Kuo, C. Y., Wu, C. H., Lo, S. L., "Leaching efficiency of copper from industrial sludge with traditional acid extraction (TAE) and microwave assisted treatment (MAT)", *Environmental Science and Health*, 40(12): 2203–2214. (2005)