

مروری بر تکنولوژی ماکروبو برای خردایش سنگ‌های کمیاب

هاجر زارعی

پژوهشگر پسادکتری دانشکده فیزیک و انرژی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

هدف از انجام این پژوهش ارائه یک روش در حال توسعه صنعتی برای خردایش سنگ‌های کمیاب می‌باشد. استفاده از روش‌های جدید بخصوص روش‌های پالس پلاسما یا امواج پلاسمای ماکروبو که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود، می‌تواند با صرف زمان و انرژی کمتر به خردایش سنگ‌ها بپردازد و راهکاری برای یکی از مهم‌ترین معضله‌های این صنعت، که انرژی است؛ باشد. در این کار، رابطه بررسی اثر خردایش و جداسازی مواد معدنی در چند مورد مروری با استفاده از تکنیک امواج ماکروبو مورد بررسی قرار گرفته و در مورد تأثیرگذاری توان صنعتی بر روی نتایج و دستگاه‌های صنعتی این مورد، اشاراتی صورت گرفت که می‌تواند مورد بررسی محققین این عرصه باشد. در تحقیقات بین‌المللی و تحقیقات داخل کشور با استفاده از دستگاه‌های صنعتی و نیمه‌صنعتی در کشورهای پیشرو در این زمینه، نتایج فوق‌العاده‌ای در استحصال مواد معدنی به دست آمده است که این امر لزوم توجه به این تحقیقات به صورت صنعتی در ایران را در آینده نزدیک نشان خواهد داد.

واژه‌های کلیدی: ماکروبو، پالس پلاسما، خردایش سنگ، مواد معدنی، فرآوری مواد معدنی

مقدمه

۱۷۶۰ کانسار آلی فلزی در ایران وجود دارد. مساحت کل مناطق احتمالی که در آن فلزات در ایران یافت شده ۶۵۰ هزار کیلومتر مربع است. رئیس سازمان توسعه و بازسازی معادن ایران (ایمیدرو) اعلام کرده است که در ایران موفق به شناسایی بیش از ۷۶۰ منطقه جدید معدنی امیدوار کننده در سراسر کشور شده است. و تنوع مواد مختلف در ایران بسیار بالاست. نمای یک معدن بزرگ روباز در شکل ۱ آمده است. مناطق استخراج سرب، روی، طلا، مس، آهن، زغال سنگ، کرومیت، آنتیموان و سایر خاکهای کمیاب در ایران موجود است.



شکل ۱: نمای یک معدن روباز

بهره برداری های ویژه ای در اکتشاف و تولید مواد معدنی مربوط به فلزات کمیاب خاکی وجود دارد. استفاده از فلزات خاکی کمیاب بسیار تخصصی اما متنوع است. این عناصر در تلفن های همراه، آهنرباهای فوق قوی و در نتیجه موتورهای و ژنراتورها، برخی از کاتالیزورهای پالایشگاهی، لیزرها و لامپهای فلورسنت یا صفحه تخت، برخی از باتری ها و ابررساناها و سایر فناوریهای مهم در زندگی مدرن استفاده می شود. فلزات خاکی کمیاب به ویژه در کاربردهای انرژی مفید هستند.

دانشمندان هشدار می دهند که کمبود فلزات کمیاب خاکی، یا استفاده انحصاری چین از آنها (به علت نزدیکی معادن)، می تواند روند انتقال به انرژی های تجدیدپذیر و دیگر فناوری های پاک را سرکوب کند.

در اواسط دهه ۱۹۹۰، چین کنترل خود بر بسیاری از بازارهای جهانی و زمینهای دارای معادن کمیاب جهان را تثبیت کرد و آخرین معدن و آسیاب آمریکایی که زمانی بر جهان تسلط داشت دلیل عدم سودآوری در سال ۲۰۰۲ بسته شد. چین در سال ۲۰۰۶ شروع به اعمال سهمیه های صادراتی کرد و صادرات به ژاپن (مصرف کننده اصلی موتورهای مینیاتوری با تکنولوژی بالا) را محدود کرد، بنابراین قیمت های جهانی سر به فلک کشید. ادارات دولتی آمریکا گزارش های فوری در مورد وقوع بحران نادر در کره زمین و تهدید آن برای امنیت ملی منتشر کرده اند.

تأمین اقتصاد کشورها با فلزات کمیاب خاکی برای امنیت ملی بسیار مهم است و شرط مهمی برای نوسازی صنعت است؛ ده ها مورد استراتژیک برای استفاده موثر از این عناصر وجود دارد. زمینه های کاربرد فلزات کمیاب در صنایع نظامی و غیرنظامی، تولید خودروهای هیبریدی، توربین های بادی، فناوری دفاعی، مخابرات، تجهیزات

رایانه ای و تلویزیونی، اتوکاتالیست ها و کاتالیزورها، لیزرها، ابررساناها و سلول های سوختی، محصولات متالورژی با خواص ویژه مرتبط است [۱].

فلزات خاکی کمیاب گروهی از ۱۷ عنصر شیمیایی مشابه هستند که برای تولید بسیاری از محصولات با تکنولوژی بالا بسیار مهم اند. لازم بذکر است که این عناصر علیرغم نامشان، در طبیعت اکثرا به وفور یافت میشوند؛ اما از نظر ایمنی خطرناک و استخراج آنها دشوار است، بنابراین برای استخراج و غنی سازی فلزات کمیاب خاکی استفاده از فناوری ها و تجهیزات صنعتی خاص بسیار موثر هستند [۲].

یکی از این روشها استفاده از امواج ماکروویو می باشد. به امواج الکترومغناطیسی که طول موج آن ها کمتر از امواج رادیویی و بیشتر از امواج فرسرخ است، ریزموج [۱] گفته می شود. طول موج امواج مایکروویو، بین ۱ میلی متر تا ۳۰ سانتیمتر است. که طول موج ۱ میلی متر با بسامد ۳۰۰ گیگاهرتز متناظر است و طول موج ۳۰ سانتی متر با بسامد ۱ گیگاهرتز متناظر است. پیشوند «مایکرو» در مایکروویو به یک طول موج در محدوده میکرومتر اشاره نمی کند بلکه دلالت بر این دارد که ریزموجها در مقایسه با امواج استفاده شده در انتشار رادیویی نوعی، کوچک هستند به طوری که طول موجهای کوتاه تری دارند [۳]. کاربرد این روش به منظور افزایش سطح استخراج PM و REM از کنسانتره های معدنی در یک میدان انرژی مایکروویو بسیار اشباع طراحی شده است. این تاسیسات یک راکتور شیمیایی مایکروویو برای انجام واکنشهای متقابل اسیدهای آلی و معدنی با عناصر کنسانتره با استفاده از انرژی امواج مایکروویو در منطقه برهم کنش است [۴]. امکانات این نوع ادوات که در حال تحقیق و توسعه در سراسر جهان می باشد و توانسته است، گامها و نتایج مثبتی را برآورده کند به شرح ذیل است.

-تسریع واکنشهای متقابل مجموعه ای از اسیدها با عناصر ایمیک کنسانتره؛

- تسریع فرایندهای شیمیایی با تأمین انرژی مایکروویو تابش شده اضافی و تبدیل آن به انرژی حرارتی با عمق نفوذ بالا؛

-انجام گرمایش انتخابی مواد با در نظر گرفتن خواص جذب انرژی مایکروویو؛

-کاهش مصرف انرژی و قدرت خرد کنندگی سنگها تحت تأثیر امواج مایکروویو؛

-کاهش رطوبت مواد اولیه معدنی تا چند دهم درصد؛

-حذف ترکیبات ناخالص در محیط شامل گازهای زائد حاصل از واکنشها؛

به طور مثال: در فرآیند بهره مندی از کنسانتره بادلثیت (محصول نهایی دی اکسید زیرکونیوم - ZrO_2)، یک عملیات فلوتاسیون معمولی ۶ ساعت به طول می انجامد. در نصب مایکروویو با فرکانس ۲۴۵۰ مگا هرتز و توان چند ده کیلو وات، این عملیات را در ۱۶ دقیقه به پایان می رساند. همچنین میزان استخراج دی اکسید زیرکونیوم می تواند تا ۹۷-۹۸ باشد. که نمونه یک دستگاه مرتبط در شکل ۲ آمده است [۵].



شکل ۲: ستاپ مایکروویو برای پردازش مواد اولیه معدنی فلزات کمیاب و کمیاب خاکی

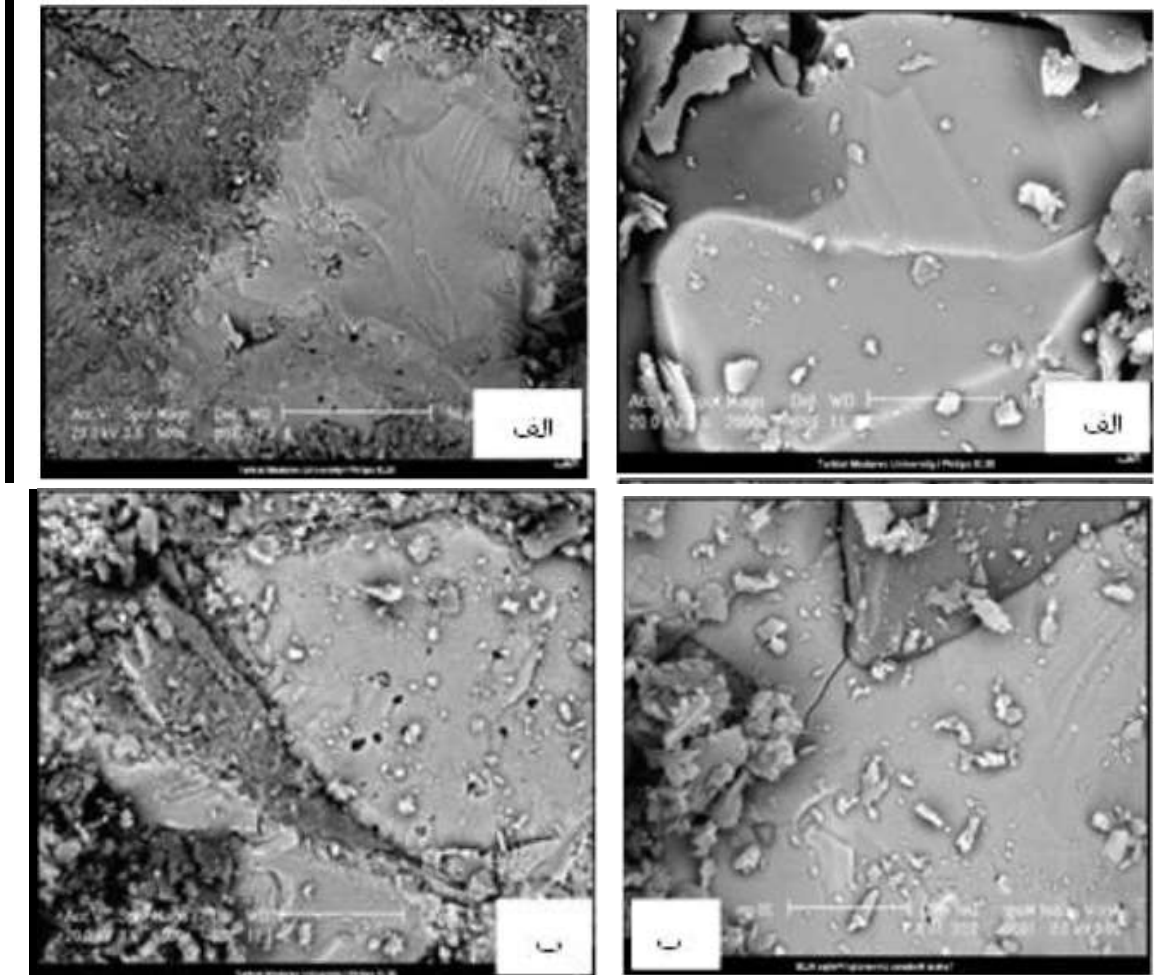


شکل ۳: (الف) سنگ معدن (ب) کنسانتره Baddeleyite پس از پردازش در ستاپ مایکروویو

مطالعات مقدماتی در این عرصه در ایران انجام شده است. به عنوان مثال کانسنگ مس از معادن سرچشمه و پلنگی رفسنجان تهیه شد. کانی اصلی مس در نمونه سرچشمه، کالکوپیریت و کانیه‌های باطله آن مسکوویت، کوارتز، پیریت و آنورتیت است. کانی اصلی مس در نمونه پلنگی، کالکوسیت و کانیه‌های باطله آن انستاتیت، آلبیت، کلسیت، هماتیت و ملاکیت است. در مطالعات از آن امواج ماکرو مولتی مد خانگی پاناسونیک مدل NN-ST656W با توان اسمی ۱۱۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز استفاده شد. تابش امواج ماکرو به دو روش متفاوت (الف) قبل از آسیاب کردن و (ب) بعد از آسیاب کردن انجام شد [۶]. در روش (الف)، به منظور بررسی تأثیر تابش امواج ماکرو بر درجه آزادی، دو نمونه سرچشمه و پلنگی با ابعاد کوچکتر از ۵ میلیمتر در زمانهای ۶۰۰، ۳۰۰، ۱۸۰، ۱۲۰، ۹۰، ۶۰، ۳۰ و ۱۰ ثانیه تحت تابش امواج ماکرو با توان ۵۵۰ وات قرار گرفتند و پس از آن به منظور تهیه بار ورودی فلوتاسیون، در آسیای گلوله‌های تا ابعاد کوچکتر از ۷۵ میکرون خرد شدند. در روش (ب)، به منظور بررسی تأثیر تابش امواج ماکرو بر شیمی سطح، دو نمونه ابتدا تا ابعاد کوچکتر از ۷۵ میکرون خرد شدند و سپس در

زمانهای ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ ثانیه تحت تابش امواج ماکرو با توان ۵۵۰ وات قرار گرفتند. برای بررسی تأثیر توان تابش، نمونه مس سرچشمه تحت توانهای ۶۰ و ۱۸۰ وات نیز عمل آوری شد. توان تابش امواج ماکرو با توجه به حداکثر توان دستگاه (۵۵۰ وات) تعیین شد. نتایج این تحقیقات در شکل ۴ آمده است [۶].

تأثیر تابش امواج ماکرو بر فلوتاسیون کانیهای سولفیدی مس



شکل ۴: الف) تصاویر SEM از نمونه مس سرچشمه الف) تصاویر SEM از نمونه مس پلنگی بدون عمل آوری

ب) پس از عمل آوری با امواج ماکرو ب) پس از عمل آوری با امواج ماکرو

در یک مطالعه دیگر، خاک مورد استفاده برای انجام آزمایشات از بخش اکسیدی معدن مس سرچشمه تهیه گردید و بعد از پولورایز و تقسیم بندی، از خاک مورد نظر یک نمونه ۵۰ گرمی برای آنالیز شیمیایی فرستاده شد. بخشی از آنالیز شیمیایی نمونه معرف در جدول ۱ آمده است [۷].

جدول ۱: آنالیز شیمیایی خاک اکسیدی

Cu	CuO%	Fe%	Mo%
0.93	52	8.29	0.007

سپس با استفاده از خاک مورد نظر، یک پالپ با درصد جامد ۵ درصد حجمی تهیه و با استفاده از اسید سولفوریک ۹۸ درصد ساخت شرکت مرک آلمان اسیدیته آن در $pH=1.5$ تنظیم گردید و پس از اعمال امواج الکترومغناطیس بر روی محلول آزمایش، و اندازه گیری دمای آن، آزمایشهای لیچینگ در ارلن آزمایشگاهی، حجم ۱۰۰ میلی لیتر، دور همزن ۵۰۰ دور بر دقیقه و زمان ۶۰ دقیقه انجام گرفت.

جهت اعمال امواج الکترومغناطیس از دستگاه ماکروفر خانگی مایسون با مدل ۹۲۸ استفاده گردید. فرکانس این دستگاه ثابت و ۲۴۵۰ مگاهرتز می باشد و سطوح مختلف انرژی، با تغییر قدرت دستگاه حاصل گردید. مشخصات این دستگاه در جدول ۲ مشاهده میشود و مقادیر قدرت و زمان اعمال اشعه در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲: دستگاه مورد استفاده (خانگی) در نتایج آزمایش

توان مصرفی	۱۴۰۰ وات
توان خروجی	۹۰۰ وات
فرکانس	۲۴۵۰ مگاهرتز
حجم	۲۸ لیتر

جدول ۳: مقادیر قدرت و زمان قرار گرفتن نمونه در دستگاه ماکروفر خانگی

قدرت	۱۰۰ درصد	۵۰	۲۰ درصد	۱۰ درصد	-
زمان قرار گرفتن در معرض امواج	۳	۱۲	۲۰	۲۰	-

نتایج حاصل از آزمایشهای فوق در جدول ۴ آمده است. با توجه به افزایش دما امکان قرار دادن نمونه در زمان-های یکسان در قدرتهای مختلف، وجود نداشت و سعی شد قبل از این که محلول به دمای تبخیر برسد، ارلن از دستگاه خارج گردد. بنابراین برای مقایسه این آزمایشها مقدار انرژی بر حسب کیلو ژول محاسبه گردید. مقدار این پارامتر در ردیف سوم جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: نتایج درصد بازیابی مس

قدرت(درصد)	۱۰۰	۵۰	۲۰	۱۰	۰
زمان در معرض قرار گرفتن	۳	۱۲	۲۰	۲۰	۰
انرژی کیلوژول	۴,۲	۸,۴	۵,۴	۲,۸	۰
دما سانتیگراد	۱۰۰	۷۵	۷۰	۶۵	۲۵
درصد بازیابی مس	۶۲	۶۲	۶۳	۶۱,۲	۵۶

نتایج درصد بازیابی آهن در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: درصد بازیابی آهن

قدرت(درصد)	۱۰۰	۵۰	۲۰	۱۰	۰
زمان در معرض قرار گرفتن	۳	۱۲	۲۰	۲۰	۰

انرژی کیلوژول	۴,۲	۸,۴	۵,۴	۲,۸	۰
دما سانتیگراد	۱۰۰	۷۵	۷۰	۶۵	۲۵
درصد بازیابی مس	۲,۲۳	۳,۸۱	۴,۴۳	۱,۱۵۴	۱,۲۸

بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود با وجود پایین بودن توان های مورد استفاده امواج ماکروویو مورد استفاده در آزمایش های محققان ایرانی، بهبود بازدهی جدا سازی مواد معدنی مشاهده شده است. در تحقیقات بین المللی و تحقیقات با استفاده از دستگاه های صنعتی و نیمه صنعتی در کشورهای پیشرو در این زمینه، نتایج فوق العاده ای در استحصال مواد معدنی به دست آمده است که بسیار لازم است این تحقیقات به صورت صنعتی نیز در ایران مورد حمایت قرار گیرد.

نتیجه گیری

استفاده از امواج ماکروویو در بازه فرکانسی حدود هزار مگا هرتز به منظور لیچینگ و یا پیش خردایش و خردایش مواد معدنی مورد بررسی در بسیاری از کشورها قرار گرفته است که از جمله مزایای آن، افزایش سرعت و بازدهی بالای این روش می باشد. در این مطالعه بررسی و مقایسه ای در مورد کارهای صنعتی بین الملل و آزمایشگاهی داخلی در مورد کارایی این روش صورت گرفته است و در نهایت با توجه به فرکانس مشترک، ستاپ ها و تحقیقات مورد بررسی، نیاز به ارائه ستاپ هایی با توان بالاتر برای کاربردهای صنعتی پیشنهاد شده است که خوشبختانه زیرساختهای آن در کشور وجود دارد. این توان ها امکان بهره برداری صنعتی را فراهم خواهد آورد. در تحقیقات بین المللی و تحقیقات داخلی با استفاده از دستگاه های صنعتی و نیمه صنعتی در کشورهای پیشرو در این زمینه، نتایج فوق العاده ای در استحصال مواد معدنی به دست آمده است که بسیار لازم است این تحقیقات به صورت صنعتی نیز در ایران مورد حمایت قرار گیرد.

تشکر و قدردانی:

از شرکت ایده بنیان راد بابت در اختیار قراردادن اطلاعات بین المللی و اطلاعات ستاپ صنعتی کمال تشکر را داریم.

منابع

۱. فرید، م.، د. شراره؛ ک. بهنام، تعیین غلظت عناصر کمیاب در خاک و گیاهان اطراف معدن مس میدوک.
۲. Sabzevari, B., et al., *Microwave-leaching of copper smelting dust for Cu and Zn extraction*. Materials, ۲۰۱۹. ۱۲(۱۱): p. ۱۸۲۲.
۳. Zeng, J., et al., *Experimental investigation on structural evolution of granite at high temperature induced by microwave irradiation*. Mineralogy and Petrology, ۲۰۱۹. ۱۱۳(۶): p. ۷۵۴-۷۴۵.

۴. Wang, Q., et al., *Fe/Mn-and P-modified drinking water treatment residuals reduced Cu and Pb phytoavailability and uptake in a mining soil*. Journal of Hazardous Materials, ۲۰۲۱. ۴۰۳: p. ۱۲۳۶۲۸,

۵. Chen, J., et al., *Mineralogical and geochemical responses of coal to igneous intrusion in the Pansan Coal Mine of the Huainan coalfield, Anhui, China*. International Journal of Coal Geology, ۲۰۱۴. ۱۲۴: p. ۳۵-۱۱

۶. میرشکاری، et al. تأثیر تابش امواج ماکرو بر فلوتاسیون کانی های سولفیدی مس. نشریه علوم و مهندسی جداسازی، ۲۰۱۹. ۱۱(۱): ۱-۱۲.

۷. برکان، et al. حذف سولفات تحت شرایط زهاب اسیدی معدن با استفاده از پیلارد نانو بنتونیت آلومینیوم و آهن. نشریه مهندسی منابع معدنی، ۲۰۱۸. ۳(۳): ۵۷-۷۵.

A Review on Microwave Technology for Crushing Rare Stones

Hajar Zareyi

Post doc Researcher, faculty of physics and energy, Amirkabir university, Tehran, Iran

Abstract:

The purpose of this study is to present an industrially developing method for crushing rare stones. The use of new methods, especially plasma pulse methods and microwave plasma waves, which are discussed in this article, can crush rocks with less time and energy, and this is a solution for one of the most important problems in this industry, which is energy. In this work, the relationship between the effect of crushing and separation of minerals in several review cases using the microwave technique has been investigated. In international research and domestic research using industrial and semi-industrial devices in leading countries in this field, extraordinary results have been obtained in mineral extraction, which necessitates attention to this industrial research in Iran in the future.
