

بهبودسازی فرایند حذف هیدروکربن‌های نفتی از خاک با استفاده از تابش ریزموج و تاثیر آن بر برخی

خصوصیات زیستی خاک

محسن سلیمانی^{۱*}، نجمه جابری^۲

۱. استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۱/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۷/۲۸)

چکیده

روش‌های گرمایی به‌عنوان روش‌های سریع و با کارایی زیاد برای حذف آلاینده‌های آلی در محیط‌های آبی و خشکی مطرح شده‌اند که استفاده از تابش ریزموج (مایکروویو) یکی از آنهاست. این مطالعه با هدف دستیابی به برخی شرایط بهینه برای حذف هیدروکربن‌های نفتی از یک خاک آلوده تحت تأثیر تابش ریزموج انجام شده است. پس از نمونه‌برداری خاک از منطقه پالایشگاه نفت تهران، نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه در معرض پرتو مایکروویو با توان (۷۷۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۵۰ وات) و فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز، زمان‌های مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه)، مقادیر مختلف رطوبت خاک (۱، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) و کربن فعال اضافه شده به خاک (۰، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی) قرار گرفتند. شرایط بهینه حذف هیدروکربن‌های خاک با استفاده از آزمایش‌های تاگوچی با آرایه متعامد L_۹ به دست آمد. تأثیر تابش مایکروویو بر برخی خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که در دامنه تغییرات مطالعه شده شرایط بهینه شامل توان مایکروویو ۱۱۰۰ وات، زمان پرتو دهی ۱۵ دقیقه، رطوبت ۱٪ وزنی خاک و کربن فعال ۵٪ وزنی بود. تابش ریزموج در شرایط بهینه منجر به حذف ۷۰ درصد هیدروکربن‌های خاک شد. اگرچه این روش بر خصوصیات زیستی خاک مانند جمعیت و تنفس میکروبی تأثیر منفی داشت، ولی می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر و سریع در خاک‌های با آلودگی مواد نفتی زیاد پس از بررسی‌های اقتصادی مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آلاینده‌های نفتی، آلودگی خاک، پاک‌سازی، مایکروویو

مقدمه

با حلال یا سورفکتانت‌ها، اکسیداسیون شیمیایی، فرآیندهای زیستی بهره‌جسته‌اند (Chien, 2012). اگرچه در سال‌های اخیر به روش‌های زیستی مانند گیاه‌پالایی و زیست‌پالایی برای آلودگی‌زدایی خاک توجه زیادی شده است، ولی کاربرد آنها در محل‌هایی که غلظت آلاینده‌ها زیاد است فاقد کارایی و یا ناکارآمد است و از طرفی استفاده از این روش‌ها مستلزم زمان طولانی است. در نتیجه توجه به توسعه روش‌های جدید پاک‌سازی که سریع‌تر، کم‌هزینه‌تر، با کارایی بیشتر و مناسب برای محدوده وسیعی از مناطق با آلودگی‌های زیاد باشند امری ضروری است (Cioni and Petarca, 2011).

در بین روش‌های موجود برای استخراج و حذف آلاینده‌های آلی روش‌های گرمایی به‌عنوان روش‌های سریع و با کارایی زیاد برای حذف آلاینده‌های آلی در محیط‌های آبی و خشکی مطرح شده‌اند که استفاده از تابش ریزموج (مایکروویو) یکی از آنهاست. کارایی استفاده از روش‌های گرمایی در برخی موارد به ۹۹٪ می‌رسد و در مقایسه با روش‌های رقیب همچون زیست‌پالایی و عصاره‌گیری با حلال، زمان کمتر و کارایی

با توجه به گسترش صنایع نفت و گاز و پتروشیمی در بسیاری از کشورهای جهان، مقادیر زیادی از مواد شیمیایی و مشتقات نفتی به محیط‌زیست وارد شده که مشکلات زیادی را به همراه داشته است. بنابراین طیف وسیعی از مناطق آلوده وجود دارند که نیاز به پاک‌سازی و بهسازی دارند. آلودگی‌های نفتی ممکن است ناشی از فرآیندهای استخراج و پالایش، حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و مصرف محصولات نفتی باشد (Chien, 2012) که با تغییر ویژگی‌ها و خصوصیات خاک و آب می‌تواند اثرات مستقیم سمی بر موجودات زنده داشته باشد (Mansurov et al., 2001). آلودگی خاک ممکن است سبب خسارات اقتصادی، فجاجع اکولوژیکی و کاهش تولید و سمیت محصولات کشاورزی شود (Lordache, 2010). مطالعات زیادی به‌منظور پاک‌سازی آلودگی‌های نفتی در خاک انجام شده است که از روش‌های مختلفی مانند آلودگی‌زدایی گرمایی، استخراج با بخار، شستشو

Shang *et al.*, 2007;) بیشتری در محیط‌های مختلف دارند (Appleton *et al.*, 2005). هزینه استفاده از تابش ریزموج نسبت به روش‌های سنتی گرمایی کمتر است که آن را برای استفاده در مقیاس‌های وسیع جذاب می‌سازد (Shang *et al.*, 2006). میکروویو از نوع امواج الکترومغناطیس در محدوده‌ی فرکانسی ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز و با طول موجی در محدوده‌ی ۱ میلی‌متر تا ۱ متر است. گرمایش میکروویو بر اساس چرخش دو قطبی ۱ است. بر اساس تابش میکروویو و نفوذ امواج به درون مواد، میدان الکتریکی در داخل مواد ایجاد می‌شود که جهت این میدان بسته به فرکانس موج تغییر می‌کند که سبب چرخش مولکول‌های قطبی و حرکت یون‌ها در داخل ماده می‌گردد و بر اثر برخورد مولکول‌ها و یون‌ها به یکدیگر و ایجاد اصطکاک، گرما تولید می‌گردد. میکروویو پتانسیل گرمایش سریع و حجمی مواد را دارد (Jacob *et al.*, 1995). در سال‌های اخیر میکروویو به‌طور گسترده‌ای در بخش مهندسی محیط‌زیست به‌کار گرفته شده است (Remya and Jih, 2011). اخیراً تحقیقاتی در زمینه استفاده از میکروویو در آلودگی‌زدایی خاک انجام شده است (Shang *et al.*, 2007; Kawala and Atamanaczuk, 1998). استفاده از انرژی میکروویو به‌عنوان یک روش پاک‌سازی در محل^۲ می‌تواند از نظر اقتصادی در مقایسه با سایر روش‌ها مقرون‌به‌صرفه باشد (Sang and Kyoung, 2010). هزینه استفاده از روش میکروویو برای پاک‌سازی پسماندهای نفتی می‌تواند ۲۰ مرتبه از روش‌های سنتی گرمایی کمتر باشد (Shang *et al.*, 2007). میکروویو دارای پتانسیل لازم برای تصفیه پساب‌های صنعتی و کشاورزی و لجن فاضلاب است (Chang *et al.*, 2011). در آلودگی‌زدایی نفت به روش میکروویو از یک منبع منتشرکننده اشعه استفاده می‌شود که در طول زمان به خاک آلوده تابانیده می‌شود. در این روش به‌منظور افزایش جذب میکروویو، خاک باید مرطوب باشد (Chien, 2012). یکی از عوامل دیگر برای افزایش کارایی، اضافه کردن کربن فعال به محیط است. ترکیبات آلی و نفت و همچنین خاک نسبت به میکروویو شفاف هستند، بنابراین نمی‌توانند مستقیماً تا دماهای بالا گرم شوند. به همین دلیل، روش گرمایی میکروویو زمانی کارآمد خواهد بود که ماده خام (خاک) با ترکیبات جذاب میکروویو همراه شود (Menendez *et al.*, 2002). واکنش بین جاذب‌های میکروویو و پرتوهای میکروویو باعث تبدیل انرژی میکروویو به انرژی گرمایی می‌گردد (Jones

et al., 2002). اضافه کردن ۰/۱ درصد وزنی کربن فعال فیبری به خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی تحت تأثیر تابش میکروویو با توان ۸۰۰ وات منجر به تجزیه ۹۹٪ آلاینده‌های هیدروکربنی در مدت زمان ۴ دقیقه شد (Li *et al.*, 2009). لی و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر مقادیر متفاوت کربن فعال (۰، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی)، توان میکروویو (۱۰۰، ۴۵۰ و ۸۰۰ وات) و رطوبت خاک (۰/۳، ۳/۰ و ۱۴/۷ درصد) را بر حذف هیدروکربن‌های نفتی در خاک بررسی کردند که در بین عوامل بررسی‌شده مقدار کربن فعال ۵ درصد، توان ۸۰۰ وات و رطوبت ۳ درصد بیشترین تأثیر را بر حذف آلاینده‌های نفتی در خاک داشتند (Li *et al.*, 2008). حذف آلاینده‌های مختلف با استفاده از تابش میکروویو با توان‌های ۷۵۰ تا ۸۵۰ وات نیز موفقیت‌آمیز بوده است (Xitao and Gang, 2006; Xitao *et al.*, 2008).

استفاده از میکروویو به‌منظور پاک‌سازی آب و خاک در ایران هنوز گسترش کافی نیافته است. با توجه به اهمیت موضوع پاک‌سازی خاک‌های آلوده به نفت در کشور و عدم کارایی و یا زمان‌بر بودن روش‌هایی مانند زیست‌پالایی و گیاه‌پالایی در خاک‌های با آلودگی زیاد، این مطالعه با هدف دستیابی به برخی شرایط بهینه برای حذف هیدروکربن‌های نفتی از یک خاک آلوده تحت تأثیر تابش ریزموج در محیط آزمایشگاهی انجام شد. از طراحی آزمایش تاگوجی و آرایه‌ها متعامد در این تحقیق جهت تعیین شرایط بهینه پاک‌سازی و تعیین ضریب اثر هر پارامتر بر بهبود فرایند پاک‌سازی استفاده گردید. همچنین تأثیر تابش میکروویو بر برخی خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک مانند درصد مواد آلی، تنفس و فعالیت میکروبی خاک نیز بررسی شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و تعیین خصوصیات آن

نمونه‌برداری خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری در منطقه پالایشگاه نفت تهران انجام گرفت. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه و خشک شدن در معرض هوا، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. برخی خصوصیات خاک شامل پ‌هاش^۳ (در عصاره ۱ به ۲/۵ خاک به آب)، هدایت الکتریکی (EC) (در عصاره ۱ به ۲/۵ خاک به آب)، درصد اجزای شن، سیلت و رس (به روش هیدرومتر)، کربن آلی (به روش واکلی بلک) (Schumacher, 2002; Waling *et al.*, 1989)، تنفس میکروبی پایه و القایی سوپسترا^۴ (Lin and

3. pH

4. Basal and substrate-induced respiration

1. Dipole Rotation

2. In situ

فاکتورها بر نتیجه، بهترین ترکیب فاکتورها به دست می‌آید (Ranjit, 2001). در این مطالعه از روش تاگوچی با آرایه متعامد L_8 شامل ۴ عامل ۳ سطحی استفاده شد. آرایش سطوح این عوامل در هر آزمایش با ۳ تکرار توسط آزمون تاگوچی تعیین شدند (جدول ۱). عوامل و سطوح آزمایشی شامل تابش (۷۷۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۵۰ وات)، مدت زمان تابش (۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه)، مقدار رطوبت خاک (۱، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) و مقدار کربن فعال اضافه شده به خاک (۰، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی) بودند. طی هر بار آزمایش ۵۰ گرم خاک درون محفظه پیرکس درون دستگاه میکروویو قرار داده شد. در هر بار آزمایش عوامل مختلف (زمان، توان ماکروویو، رطوبت، مقدار جاذب) به منظور تعیین شرایط بهینه جهت افزایش کارایی پاک‌سازی خاک مطابق جدول (۱) تغییر داده شد. مقدار ۵۰ گرم خاک آلوده به‌عنوان شاهد (نمونه زمان صفر که در معرض میکروویو قرار نگرفت) در نظر گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری دما پس از هر بار پرتودهی، دستگاه خاموش و دما توسط ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری شد. پس از پایان آزمایش نمونه‌ها جمع‌آوری و تا زمان انجام آزمایش‌ها در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

تجزیه و تحلیل آماری

جهت اجرای آزمون تاگوچی از نرم‌افزار Qualitek 4 استفاده شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم گردید. در طراحی آزمایش تاگوچی، آزمایش‌ها در غالب ماتریس‌هایی ارائه می‌شوند که به آن‌ها آرایه متعامد گفته می‌شود که سطوح آن سطوح عامل‌ها و ستون‌های آن تعداد عامل‌ها را نشان می‌دهند. آرایه‌های متعامد به صورت (X^y) Ln نشان داده می‌شود. L آرایه‌هایی که در آزمایش به کار رفته، n تعداد آزمایش‌ها، X تعداد سطح عامل‌ها، y حداکثر تعداد عامل‌هایی که با آرایه مورد نظر قابل بررسی است. در این مطالعه آرایه‌های متعامد به صورت $L_8(3^4)$ و تعداد آزمایش ۹ بود. از تحلیل واریانس برای تعیین خطا و اهمیت نسبی هر کدام از عوامل یا فاکتورها با در نظر گرفتن نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود. k عوامل سیگنال یا کنترل‌پذیر و N عوامل نویز یا اغتشاش را نشان می‌دهد. از تحلیل S/N برای تعیین بهترین نوع ترکیب سطوح عوامل مختلف استفاده می‌شود. بسته به اینکه هدف چه نوع بهینه‌سازی باشد، نحوه محاسبه این نسبت متفاوت است و این اطمینان حاصل می‌شود که پاسخ نهایی کمترین حساسیت را نسبت به عوامل اغتشاش یا نویز دارد (Zolfaghari et al., 2011).

Brooks, 1999) و جمعیت باکتری‌های خاک به روش رقیق‌سازی مرحله‌ای^۱ و کشت بر روی محیط کشت نوترینت آگار برحسب تعداد کلونی تشکیل‌شده (CFU) در گرم خاک (Bloem et al., 2005) اندازه‌گیری شد. به منظور اندازه‌گیری غلظت اولیه هیدروکربن‌ها در خاک از روش جرم‌سنجی (عصاره-گیری با استفاده از استون و هگزان به نسبت ۱:۱) استفاده گردید (USEPA, 2006).

تغییر شکل میکروویو خانگی برای انجام آزمایش

یک دستگاه میکروویو خانگی تغییر شکل داده شده با بیشینه توان ۱۲۵۰ وات و فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز با قابلیت تنظیم توان به‌عنوان منبع تابش ریزموج استفاده شد. در محفظه داخلی دستگاه یک محفظه ۱ لیتری از جنس پیرکس تعبیه گردید که به وسیله لوله‌های شیشه‌ای به خارج از محفظه داخلی متصل بود. در قسمت بیرونی یک قسمت برای جمع‌آوری و بازگرداندن مواد تبخیری در نظر گرفته شد که به مبرد متصل بود. سایر قسمت‌های میکروویو مانند منبع تولید امواج (لامپ مگنترون) بدون تغییر ماند. در انتهای مبرد به منظور خروج سریع‌تر گازهای باقیمانده در ظرف پیرکس و خنک شدن مسیر یک پمپ خلأ در نظر گرفته شد (شکل ۱).



شکل ۱. دستگاه میکروویو تغییر شکل یافته مورد استفاده جهت تابش میکروویو به خاک

تابش میکروویو به خاک آلوده

پارامترهای زیادی در افزایش جذب میکروویو، افزایش دما و در نتیجه کارایی فرآیند پاک‌سازی تأثیر دارد که روش تاگوچی می‌تواند تأثیر چندین فاکتور را به‌طور هم‌زمان و با هزینه کمتر بررسی و شرایط بهینه را ارائه کند. با مطالعه تأثیر هر کدام از

1. Serial Dilution

جدول ۱- شرایط آزمایش‌های مختلف با در نظر گرفتن آرایه متعامد L_۹ تاگوچی

آزمایش	رطوبت (% وزنی)	جاذب (% وزنی)	زمان (دقیقه)	توان مایکروویو (وات)
۱ (T1)	۱	۰	۵	۷۷۰
۲ (T2)	۱۰	۲/۵	۱۰	۷۷۰
۳ (T3)	۱۵	۵	۱۵	۷۷۰
۴ (T4)	۱۵	۲/۵	۵	۱۱۰۰
۵ (T5)	۱	۵	۱۰	۱۱۰۰
۶ (T6)	۱۰	۰	۱۵	۱۱۰۰
۷ (T7)	۱۰	۵	۵	۱۲۵۰
۸ (T8)	۱۵	۰	۱۰	۱۲۵۰
۹ (T9)	۱	۲/۵	۱۵	۱۲۵۰

نتایج و بحث

خصوصیات خاک

خاک مورد مطالعه دارای بافت شن لومی (۱۰٪ سیلت، ۷۵٪ شن و ۱۵٪ رس) با هدایت الکتریکی ۷۵/۷۹۳ دسی‌زیمنس بر متر، پهاش ۷/۰۳، رطوبت اولیه ۳/۵ درصد، کربن آلی ۳/۶ درصد و کل هیدروکربن‌های نفتی (TPHs) بیش از ۲۰ درصد وزنی خاک بود. وجود هیدروکربن‌های نفتی در خاک منجر به افزایش کربن آلی خاک شده است. همچنین زیاد بودن شوری خاک نیز ممکن است به دلیل غلظت زیاد مواد نفتی در خاک به‌ویژه نفت خام فراوری نشده که معمولاً دارای املاح فراوانی است، باشد. بر اساس استاندارد ارائه شده توسط بخش کیفیت محیط‌زیست^۲ آمریکا، غلظت قابل‌قبول مواد نفتی (گازوئیل، دیزل سبک، دیزل سنگین) در خاک در سطح I ۴۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (DEQ, 2003). غلظت نفت در خاک مورد مطالعه بیش از ۲۰۰۰ برابر حد بالایی استاندارد مذکور است که بیانگر آلودگی بسیار زیاد خاک است.

بهینه‌سازی شرایط فرآیند پاک‌سازی خاک با تابش ریزموج

اولویت‌بندی عوامل مؤثر در پاک‌سازی بر اساس نسبت سیگنال به نویز (S/N) محاسبه گردید. با توجه به این‌که هدف حذف و یا کاهش غلظت هیدروکربن‌ها در خاک بود، داده‌های غلظت باقیمانده با کمترین مقدار S/N، بیشترین اولویت را به خود اختصاص دادند. نتایج مؤید این بود که درصد رطوبت اولیه خاک، مقدار جاذب، توان مایکروویو و مدت زمان تابش مایکروویو به ترتیب مهمترین عوامل تأثیرگذار بر فرآیند حذف هیدروکربن‌ها در خاک بودند. عامل رطوبت خاک بیشترین سهم

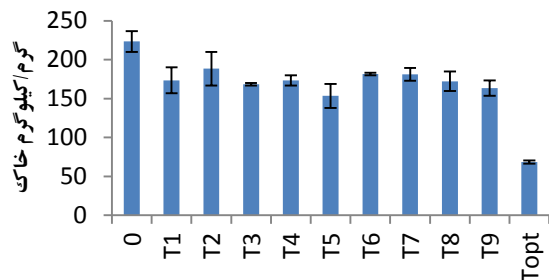
(حدود ۵۵٪) را در بین فاکتورها در فرایند حذف آلاینده‌ها داشت (جدول ۲) این موضوع نشان می‌دهد که مقدار رطوبت خاک نقش مهمی را در فرایند حذف هیدروکربن‌ها در اثر پرتوافکنی مایکروویو ایفا می‌کند. به نظر می‌رسد که در رطوبت‌های زیاد (۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) بیشتر انرژی صرف تبخیر می‌شود و هیدروکربن‌ها فرصتی کمتری پیدا می‌کنند که تبخیر و از توده خاک جدا شوند. این نتایج با نتایج سایر پژوهشگران در حذف هیدروکربن‌های نفتی و بای‌فنیل‌های چندکلره (PCBs)^۳ در خاک با استفاده از تابش مایکروویو همخوانی دارد (Li et al., 1992; Windgasse and Dauerman, 2008). با توجه به تحقیقات مشخص شده است که آب نقش مهمی را در حذف تجزیه‌ی هیدروکربن‌های نفتی به‌وسیله‌ی مایکروویو ایفا می‌کند. آب به‌عنوان گیرنده مایکروویو در میان توده خاک آلوده باعث جذب انرژی آن می‌شود. این انرژی متعاقباً به شکل گرما به نفت منتقل می‌شود. آلاینده‌های آلی تحت تأثیر انرژی مایکروویو می‌توانند تبخیر شوند (Kawala and Atamanaczuk, 1998). نشان داده شده است که زمان کمتری برای حذف آلاینده‌ها تحت تأثیر مایکروویو در خاک خشک نسبت به خاک مرطوب وجود داشت، اما با اضافه کردن مقدار مناسبی آب با این‌که زمان ۲ برابر شد ولی در دمای کمتری فرایند حذف انجام گردید (Kawala and Atamanaczuk, 1998). تأثیر ۴ عامل ۳ سطحی (مقدار کربن فعال، درصد رطوبت، توان مایکروویو و جرم توده خاک) بر کارایی پاک‌سازی خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی به کمک مایکروویو بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که مقدار کربن فعال، توان مایکروویو و زمان پارامترهای مهم و مؤثر بر حذف آلاینده‌ها بودند (Li et al., 2009).

3. Polychlorinated Biphenyls

1. Total Petroleum Hydrocarbons
2. Department of Environmental Quality

جدول ۲- تجزیه واریانس آزمون تاگوچی (خروجی نرم‌افزار Qualitek 4) و سهم عوامل مختلف در حذف آلاینده‌های نفتی در خاک

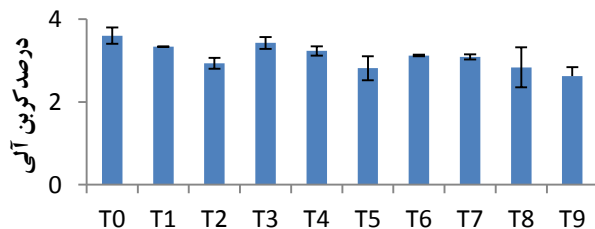
درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	درصد (سهم)
توان میکروویو	۸/۶	۴/۳	۱۳/۹
مدت زمان تابش	۵/۷	۲/۸	۹/۱
مقدار رطوبت خاک	۳۴/۳	۱۷/۱	۵۵/۴
مقدار جاذب در خاک	۱۳/۴	۶/۷	۲۱/۶



شکل ۲. میانگین غلظت هیدروکربن‌ها و انحراف معیار آن در خاک پس از تابش میکروویو در تیمارهای مختلف آزمایشی تاگوچی (T1-T9). تیمار شاهد (T0) و در شرایط بهینه به دست آمده از آزمون‌های تاگوچی (Topt).

تأثیر میکروویو بر مقدار کربن آلی خاک

نتایج نشان داد که مقدار کربن آلی موجود در خاک آلوده پس از پرتودهی میکروویو کاهش یافت (شکل ۳). علت زیاد بودن مقدار کربن آلی در خاک به بالا بودن غلظت هیدروکربن‌های نفتی در خاک مربوط است. با توجه به این که خاک متعلق به منطقه تهران است و در این منطقه همانند سایر مناطق خشک ایران مقدار مواد آلی و کربن آلی خاک کم است، بنابراین بالا بودن کربن آلی حاکی از وجود ترکیبات آلی دیگری به غیر از مواد آلی گیاهی و جانوری در خاک است. نتایج کاهش کربن آلی خاک با کاهش هیدروکربن‌های نفتی در خاک در اثر تابش میکروویو همخوانی داشت.



شکل ۳. میانگین درصد کربن آلی و انحراف معیار آن در خاک پس از تابش میکروویو در تیمارهای مختلف آزمایشی تاگوچی (T1-T9) و تیمار شاهد (T0)

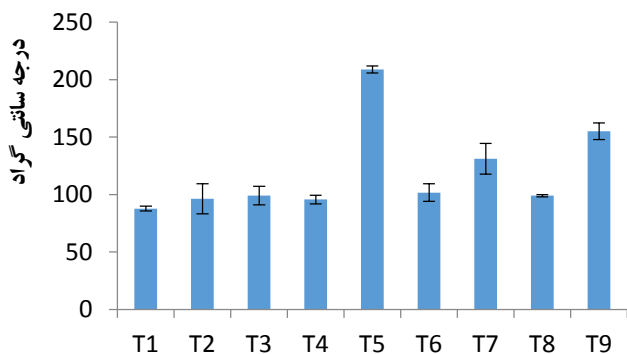
تأثیر تابش میکروویو بر برخی خصوصیات زیستی خاک

نتایج آزمون تنفس میکروبی نشان داد که پس از پرتودهی میکروویو تنفس به طور متوسط تا ۱/۵ برابر کاهش می‌یابد. علت این است که در این روش پاک‌سازی، دمای خاک به بیش از

با توجه به نتایج آزمون تاگوچی، شرایط بهینه آزمایش شامل رطوبت ۱٪، مقدار جاذب کربن فعال ۵٪، توان پرتودهی ۱۱۰۰ وات و زمان ۱۵ دقیقه بود. پرتودهی منجر به کاهش قابل توجه غلظت کل هیدروکربن‌های نفتی در خاک گردید (شکل ۲). مقدار کاهش یافته هیدروکربن‌ها در خاک در تیمارهای در نظر گرفته در آزمون تاگوچی (جدول ۱) بین ۱۵ تا ۳۱ درصد بود. در شرایط بهینه مقدار حذف هیدروکربن‌ها به ۷۰ درصد رسید (شکل ۲). این موضوع کارایی قابل توجه حذف هیدروکربن‌های نفتی در مدت زمان کوتاه (۱۵ دقیقه) در یک خاک با آلودگی زیاد را نشان می‌دهد. استفاده از روش‌های دیگر مانند گیاه‌پالایی و زیست‌پالایی برای حذف هیدروکربن‌ها در خاک‌هایی با این درصد بالا، چنین کارایی را نخواهد داشت (Shang et al., 2007). روش میکروویو نسبت به روش‌هایی مانند گیاه‌پالایی در مدت زمان کمتری می‌تواند آلاینده‌های آلی را حذف نماید (Li et al., 2009). با این وجود توجه به اثرات جانبی زیست‌محیطی آن ضروری است. چون در آزمون تاگوچی تعداد آزمایش‌ها نسبت به آزمایش‌های فاکتوریل کاهش می‌یابد، امکان بررسی اثر متقابل همه فاکتورها وجود ندارد. با این وجود امکان مقایسه اثرات متقابل فاکتورها به صورت جفتی از طریق محاسبه شاخص SI^۱ وجود دارد. مقایسه این شاخص نشان داد که بیشترین مقدار آن (۵۱/۷٪) برای اثر متقابل توان میکروویو و زمان و کمترین مقدار آن (۸/۱٪) برای اثر متقابل توان میکروویو و رطوبت بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش توان و زمان تابش میکروویو کارایی حذف آلاینده‌ها در خاک افزایش می‌یابد. لی و همکاران (۲۰۰۹)، با تابش میکروویو با توان ۸۰۰ وات، رطوبت خاک ۳ درصد و اضافه کردن کربن فعال به میزان ۵ درصد وزنی به خاک حاوی ۱۰/۲ درصد وزنی هیدروکربن‌های نفتی موفق به تجزیه ۹۹٪ این ترکیبات در مدت زمان ۱۰ دقیقه شدند (Li et al., 2009). با توجه به این که مقدار هیدروکربن‌های نفتی در خاک در پژوهش حاضر حدود دو برابر بوده است، حذف ۷۰ درصدی آلاینده‌ها در شرایط بهینه مؤید بازده مناسب این روش است.

1. (Interaction) Severity Index

کربن فعال، که به عنوان جاذب انرژی میکروویو و ایجاد کننده نقاط داغ در محیط عمل می‌کند، و نیز کم بودن میزان رطوبت خاک به عنوان منبع مصرف کننده انرژی حرارتی تولیدی است.



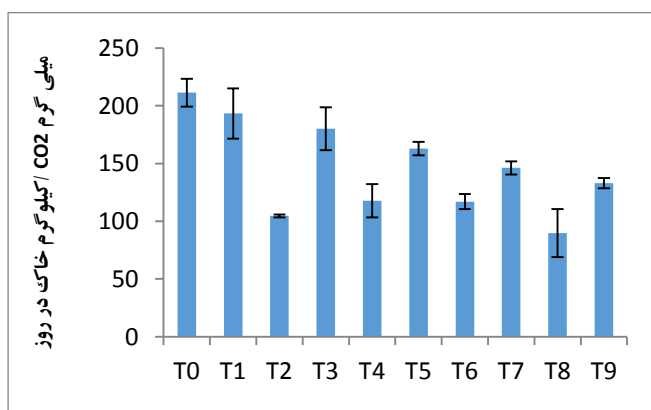
شکل ۴. دمای خاک پس از پرتو دهی با میکروویو در تیمارهای مختلف آزمایشی تاگوچی (T1-T9)

۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (شکل ۴) و حتی در برخی تیمارها تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. این در حالی است که بهینه بازه دمایی برای فعالیت باکتری و رشد آن حدود ۲۵-۳۰ درجه و بیشترین دمای قابل تحمل برای رشد اکثر باکتری‌ها ۴۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (Pietikainen *et al.*, 2005). بنابراین پرتوافکنی میکروویو با افزایش دما منجر به مرگ اکثر ریزجانداران خاک می‌گردد. آزمون آماری (t جفت شده) نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین جمعیت باکتری‌ها قبل و بعد از پرتو دهی میکروویو در خاک در سطح اطمینان ۵ درصد وجود داشت. البته نتایج شمارش جمعیت باکتری‌های خاک نشان داد که با وجود دمای بالا هنوز باکتری‌هایی در خاک وجود دارند که توانسته‌اند در دمای بالا نیز زنده بمانند (جدول ۳). بیشترین دما در تیمار T5 به دست آمد که در آن رطوبت خاک ۱ درصد وزنی و مقدار جاذب (کربن فعال) بیشترین مقدار (۵ درصد وزنی) بود. بالا رفتن دما در این تیمار به علت وجود

جدول ۳. جمعیت باکتری‌ها ($\text{CFU/g} \times 10^3$) در نمونه‌های خاک شاهد (قبل از پرتو دهی) و نمونه‌های خاک پس از پرتو دهی میکروویو در تیمارهای مختلف آزمایشی تاگوچی (T1-T9)

تیمار	شاهد	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
جمعیت باکتری	۹/۰۰	۶/۰۰	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۳۳	۱/۶۷	۲/۰۰	۲/۰۰

روش اتوکلاو یک روش مؤثر جهت کاهش قابل توجه ریز موجودات خاک بوده است (Darbar and Lakzian, 2007). نتایج نشان داده که میکروویو در کاهش زیست‌توده میکروبی بسیار مؤثر است. این روش سبب شکستن پیوندهای C-C می‌شود. به علت دمای بالا و آزاد شدن اسید آلی در نتیجه شکسته شدن ترکیبات هیومیکی خاک، امکان از بین رفتن ریزجانداران خاک وجود دارد (Darbar and Lakzian, 2007).



شکل ۵. سرعت تنفس القایی سوبسترا پس از پرتو دهی خاک در تیمارهای مختلف آزمایشی تاگوچی (T1-T9)

نتایج سرعت تنفس القایی سوبسترا (شکل ۵) که همراه با افزودن مقادیر گلوکز بود، نسبت به نتایج سرعت تنفس پایه (شکل ۶) با پرتوافکنی میکروویو و افزایش دما همخوانی بهتری نشان داد. نتایج آزمون آماری (t جفت شده) نشان داد که بین نتایج تنفس القایی سوبسترا و تنفس پایه در سطح اطمینان ۵ درصد تفاوت معنی‌دار وجود داشت. بیشتر ریزجانداران خاک در حالت غیرفعال هستند؛ بنابراین سرعت تنفس پایین دارند. از این رو افزودن گلوکز به عنوان منبع کربن برای ریزجانداران خاک می‌تواند تنفس را افزایش دهد. این نرخ تنفس القایی به شدت تحت تأثیر مقدار آب است. به منظور کاهش اثر آب بر تنفس و افزایش توزیع همگن گلوکز در خاک، گلوکز به صورت محلول به خاک افزوده می‌شود. معمولاً نرخ تنفس سوبسترای القایی با افزودن گلوکز محلول به خاک افزایش می‌یابد (Lin and Brooks, 1999). پرتو دهی نمونه‌های خاک توسط میکروویو با گذشت زمان و کاهش رطوبت منجر به کاهش جمعیت جانداران خاک می‌گردد (Ferris, 1983). میکروویو به عنوان یک وسیله برای حذف پاتوژن‌های خاک نیز معرفی شده است (Ferris, 1983). همچنین در مطالعه‌ای دیگر جهت استریل کردن خاک از میکروویو استفاده شده است که بعد از

توان میکروویو و مدت‌زمان پرتودهی به ترتیب بیشترین تأثیر را در کارایی حذف هیدروکربن‌ها در خاک با استفاده از میکروویو داشتند. با توجه به کارایی به‌دست‌آمده در شرایط بهینه، این روش می‌تواند در پاک‌سازی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی در پالایشگاه‌ها و سایر مناطق آلوده به نفت که مقدار هیدروکربن‌های نفتی در خاک زیاد است و به‌طورکلی خصوصیات خاک مخصوصاً خصوصیات زیستی خاک دگرگون شده است، استفاده گردد. در مورد ترکیبات آزادشده در این فرایند برخی پژوهش‌ها نشان داده است که امکان تبخیر بعضی آلاینده‌های آلی بدون تغییر از خاک وجود دارد. برخی هیدروکربن‌های سنگین ممکن است به گونه‌های سبک‌تر شکسته شوند و یا به آب و دی‌اکسید کربن تجزیه شوند (Li et al., 2009). در هر صورت جمع‌آوری ترکیبات آزادشده در حین فرایند پاک‌سازی ضروری است. شناسایی ترکیبات آزادشده طی فرایند پاک‌سازی با استفاده از تابش میکروویو و تأثیر این روش بر آنزیم‌های موجود در خاک می‌تواند در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

RERERENSECS

Appleton, T., Colder, V., Kingman, S., Lowndes, I. and Read, A. (2005) Microwave technology for energy-efficient processing of waste. *Applied Energy*, 81, 85–113.

Bloem, J., Hopkins, D. W. and Benedetti, A. (2005) Microbiological methods for assessing soil quality. Wallingford: CABI.

Chang, C. J., Tyagi, V. K. and Lo S. L. (2011) Effects of microwave and alkali induced pretreatment on sludge solubilization and subsequent aerobic digestion. *Bioresource Technology*, 102, 7633–7640.

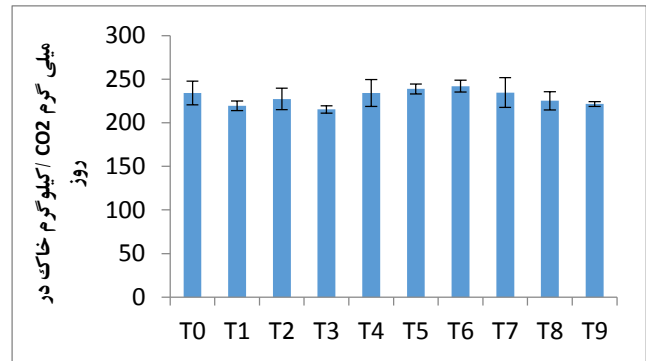
Chien, Y. C. (2012) Field study of in situ remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil on site using microwave energy. *Journal of Hazardous Materials* 15, 457–461.

Cioni, B. and Petarca, L. (2011) Petroleum products removal from contaminated soils using microwave heating. *Chemical Engineering Transactions*, 24, 1033–1038.

Darbar, S. R. and Lakzian, A. (2007) Evaluation of chemical and biological consequences of soil sterilization methods. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 5, 87–91.

Department of Environmental Quality (DEQ), (2003) Risk-Based Decision Making for the Remediation of Petroleum-Contaminated Sites. State of Oregon, Land Quality Division.

Ferris, R. S. (1983) Effect of microwave oven treatment on microorganisms in soil. *The American Phytopathological Society*, 74(1), 121–126.



شکل ۶. سرعت تنفس پایه پس از پرتودهی خاک در تیمارهای مختلف آزمایشی تاگوچی (T1-T9)

نتیجه‌گیری کلی

انرژی میکروویو به‌منظور حذف هیدروکربن‌های نفتی به علت توانایی آن در ایجاد گرمای قابل‌توجه در این مطالعه استفاده شد. این روش می‌تواند در شرایط بهینه به‌دست‌آمده از آزمون تاگوچی با کارایی ۷۰ درصدی آلاینده‌های نفتی را در مدت زمان ۱۵ دقیقه حذف کند. با این وجود تأثیر تابش بر جمعیت و تنفس میکروبی منفی بود که از معایب این روش به شمار می‌رود. مقدار رطوبت خاک، مقدار جاذب کربنی استفاده‌شده،

Jacob, J., Chia, L. H. L. and Boey, F. Y. C. (1995) Review—thermal and non-thermal interaction of microwave radiation with materials. *Journal of Materials Science*, 21, 5321–5327.

Jones, D. A., Lelyveld, T. P., Mavrofidis, S. D., Kingman, S. W. and Miles, N. J. (2002) Microwave heating applications in environmental engineering – a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 34, 75–90.

Kawala, Z. and Atamanaczuk, T. (1998) Microwave-enhanced thermal decontamination of soil. *Environmental Science and Technology*, 32, 2602–2607.

Lin, Q. and Brooks, P. C. (1999) An evaluation of the substrate-induced respiration method. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, 1969–1983.

Li, D., Quan, X., Zhang, Y. and Zhao, Y. (2008) Microwave-induced thermal treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Soil and Sediment Contamination*, 17, 486–496.

Li, D., Zhang, Y., Quan, X. and Zhao, Y. (2009) Microwave thermal remediation of crude oil contaminated soil enhanced by carbon fiber. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 1290–1295.

Lordache, D. 2010. Utilization of microwave energy for decontamination of oil polluted soils. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 44 (4), 213–221.

Mansurov, Z. A., Ongarbaev, E. K. and Tuleutaev, B. K. (2001) Contamination of soil by crude oil and drilling muds: Use of wastes by production of

- road construction materials. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 6, 441–443.
- Menendez, J. A., Inguanzo, M. and Pis, J. J. (2002) Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge, *Water Research*, 36, 3261–3264.
- Pietikainen, J., Pettersson, M. and Baath, E. (2005) Comparison of temperature effects on soil respiration and bacterial and fungal growth rates, *FEMS Microbiology Ecology*, 52, 49–58.
- Ranjit, K. R. (2001). Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement. New York: Wiley.
- Remya, N. and Jih, G. L. (2011) Current status of microwave application in wastewater treatment, A review. *Chemical Engineering Journal*, 166, 797–813.
- Sang, A. H. and Kyoung, S. C. (2010) A study of a combined microwave and thermal desorption process for contaminated soil. *Environmental Engineering Research*, 15(4), 225–230.
- Schumacher, B. A. (2002) Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments. United States Environmental Protection Agency Environmental Sciences Division National.
- Shang, H., Robinson, J. P., Kingman, S. W., Snape, C. E. and Wu, Q. (2007) Theoretical study of microwave enhanced thermal decontamination of oil contaminated waste. *Chemical Engineering and Technology*, 30(1), 121–130.
- Shang, H., Kingman, S. W., Snape, C. E. and Robinson, J. P. (2006) Microwave remediation of oil contaminated soils. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25, 113.
- USEPA (2006). In situ Treatment Technologies for Contaminated Soil. Engineering Forum Issue Paper. USA.
- Waling, I. W., Vanvark, V. J. G., Houba, J. J. and Vander, I. (1989) Soil and plant analysis, a series of syllab. In Dixon, J. B., Weed, S. B. (Eds.), Plant analysis procedures. Wageningen Agriculture University. pp. 567–589.
- Windgasse, G. and Dauerman L. (1992) Microwave treatment of hazardous wastes: remediation of soils contaminated by non-volatile organic chemicals like dioxins. *Microwave Power Electromagnetic Energy Journal*, 27, 54–61.
- Xitao, L. and Gang, Y. (2006) Combined effect of microwave and activated carbon on the remediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil, *Chemosphere*, 63, 228–235.
- Xitao, L., Quan, Z., Guixiang, Z. and Run, W. (2008) Application of microwave irradiation in the removal of polychlorinated biphenyls from soil contaminated by capacitor oil, *Chemosphere*, 72, 1655–1658.
- Zolfaghari, Gh., Esmaili-Sari, A., Anbia, M., Younesi, H., Amirmahmoodi, Sh. and Ghafari-Nazari, A. (2011) Taguchi optimization approach for Pb (II) and Hg (II) removal from aqueous solutions using modified mesoporous carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 192, 1046–1055.