

استفاده از میکروارگانیسم‌های بومی در کاهش آلودگی نفتی در خاک پالایشگاه تهران

مریم فراهانی^{۱*}، سیداحمد میرباقری^۲

۱-استادیار گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

bagheri@kntu.ac.ir

۲-استاد گروه عمران محیط زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۰/۷ تاریخ پذیرش: ۹۰/۵/۲۵

چکیده

هیدروکربن‌های نفتی از عمده‌ترین آلاینده‌های اکوسیستم‌های آبی و خاکی در سراسر دنیا محسوب می‌شوند. در تحقیق حاضر برای کاهش هیدروکربن‌های نفتی در خاک آلوده پالایشگاه تهران مطالعه‌ای بر روی روش تجزیه بیولوژیکی صورت گرفت. در نتیجه جداسازی میکروب‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن‌های نفتی از خاک منطقه صورت گرفته و در ادامه، بهینه‌سازی شرایط فیزیکیوشیمیایی مؤثر بر تجزیه بیولوژیکی با استفاده از غلظت‌های مختلف سوبسترای نفتی و تغییر مشخصه‌های دما، pH و مواد غذایی انجام شد. در خاتمه نیز با تلقیح میکروارگانیسم‌های جداسازی شده به خاک و تغییر مشخصه‌های محیطی، میزان حذف بیولوژیکی هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای در خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد: حداکثر رشد باکتریایی در نسبت ۲۰ درصد آلاینده نفتی، pH ۷/۵ و دمای ۳۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود. همچنین با آزمایش بر روی منابع متعدد غذایی مشخص شد؛ بهترین نسبت C:N:P برای اوره، نترات آمونیوم و سولفات آمونیوم به ترتیب ۱:۵:۱، ۱۰۰:۱۰:۱ و ۱۰۰:۱۰:۱ است. همچنین نتایج نشان داد، روش تجزیه بیولوژیکی قادر است در تیمارهای مورد آزمایش در مدت ۴ هفته بین ۳۲/۱٪ تا ۷۰/۵٪ روند کاهش آلاینده‌های نفتی در خاک را بهبود بخشد. بنابراین، استفاده از روش بیولوژیکی برای پاکسازی هیدروکربن‌های نفتی در خاک به دلیل سادگی اجرا، مقرون به صرفه بودن و حذف کامل آلودگی بسیار مناسب بوده و با توجه به تنوع این هیدروکربن‌ها در خاکهای آلوده به مواد نفتی، پیشنهاد می‌شود، تحقیقات مشابهی در سایر پالایشگاههای نفتی انجام گیرد.

کلید واژه

تجزیه بیولوژیکی، هیدروکربورهای نفتی، پالایشگاه تهران، ترکیبات PAH، خاک

سر آغاز

فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی انجام می‌پذیرد. روشهای متعددی برای کاهش آثار زیست محیطی آلودگی نفتی توسعه یافته است، ولی مطالعه بر روی روشهای ساده، سریع و ارزانقیمت در این زمینه ضروری است. یکی از بهترین روشهای احیای خاکهای آلوده استفاده از توانایی میکروارگانیسم‌ها در تجزیه ترکیبات سمی، طی فرایند پاکسازی بیولوژیکی است. روش بیولوژیکی به صورت طبیعی^۱، تحریک میکربی^۲، تهویه زیستی^۳، افزایش میکربی^۴، مزرعه‌ای^۵، کوددهی^۶ و گیاه پالایی^۷ قابل انجام است. پاکسازی بیولوژیکی نفت در خاک را می‌توان به وسیله تحریک میکروارگانیسم‌های بومی^۸، افزایش مواد غذایی و اکسیژن به خاک یا تلقیح کنسرسیون‌های میکربی غنی شده^۹ به خاک بهبود بخشید. برای بهینه‌سازی شرایط تجزیه زیستی، می‌باید خصوصیات منطقه آلوده قبل از انجام عملیات

هیدروکربن‌های نفتی از عمده‌ترین آلاینده‌های اکوسیستم‌های آبی و خاکی در سراسر دنیا محسوب می‌شوند. هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای که اختصاصاً PAHs^۱ نامیده می‌شوند، گروهی از ترکیبات آلی هستند که دارای ۲ یا چند حلقه بنزن و در بعضی مواقع حلقه‌های آروماتیک هستند. حلقه‌های مجاور توسط دو کربن مشترک با یکدیگر اتصال دارند. منشاء ترکیبات PAH در محیط زیست ناشی از عوامل طبیعی و انسانی است. از آنجایی که ترکیبات PAH دارای خاصیت سرطانزایی و جهش‌زایی بوده و سلامت جامعه را تهدید می‌کنند، حذف آنها از خاک امری ضروری است (Cheney, et al., 2009; Shojaosadati and Hashemi, 2002). پاکسازی آلودگی نفتی خاک به روشهای

ایستگاههای نمونه برداری با استفاده از دستگاه GPS مشخص شد. سپس در آزمایشگاه نمونه‌ها را پس از خشک شدن، با الکی ۲ میلی‌متری الک کرده و بر روی کلیه آنها با ۳ تکرار، آزمایش‌هایی برای اندازه‌گیری مقادیر مشخصه‌های pH، درصد رطوبت اشباع، CEC، موادآلی، بافت خاک، درصد تخلخل، نیتروژن کل و فسفر انجام گرفت (مرکز تحقیقات آب و خاک، ۱۳۸۰).

جداسازی و اندازه‌گیری ترکیبات PAHs در نمونه‌ها

برای اندازه‌گیری میزان ترکیبات PAH در نمونه‌ها، ابتدا این ترکیبات به‌وسیله عملیات استخراج با حلال دی‌کلرومتان و استفاده از دکتوردر مورد نمونه‌های پساب، و دستگاه اولتراسونیک در مورد نمونه‌های خاک، جدا شد.

ترکیبات جدا شده در مرحله قبل برای جداسازی حلال و تغلیظ نمونه‌ها، درون روتاری به‌وسیله خلاء خشک و تغلیظ شدند، سپس به روش کروماتوگرافی ستونی با استفاده از ستون سلیکاژل و آلومینا عملیات خالص‌سازی بر روی آنها انجام شد.

در خاتمه میزان ۱۶ ترکیب مختلف از ترکیبات PAH شامل؛ نفتالین، اسنتالین، اسنتن، آنتراسن، دی بنز (a,h)، آنتراسن، بنزو (a) پیرن، آنتراسن، کرایزن، فلورن، فناترن، فلورانتن، پیرن، بنزو (a) پیرن، بنزو (ghi) پیرن، بنزو (b) فلورانتن، بنزو (k) فلورانتین و ایندو (۱،۲،۳-cd) پیرن، در نمونه‌ها با دستگاه HPLC مدل Waters PAH ۵۱۰ مجهز به دکتور فلورسانس و ستون C18 S-5 μm packing materials طبق استاندارد ISO اندازه‌گیری شد و مجموع آنها گزارش شد (Samimi, et al., 2009).

طرز تهیه آلاینده نفتی (سوبسترا)

آلاینده نفتی مورد نظر با استفاده از ته مانده خلاء در برج تقطیر^{۱۱} و نفت خام پالایشگاه تهران به نسبت ۵ درصد تهیه شده و برای انجام آزمایش‌های میکروبیولوژیکی به مدت ۵ دقیقه در اتوکلاو استریل شد.

غنی‌سازی میکرب‌های نفت‌خوار در نمونه‌های خاک

برای جداسازی میکرب‌های تجزیه‌کننده ترکیبات PAH از خاک، ابتدا محیط کشت Oil broth که یک محیط کشت پایه معدنی و فاقد منبع کربن است و حاوی ترکیبات سولفات آمونیم، سولفات منیزیم، کلرید آهن و عناصر کمیاب بوده و به‌وسیله بافر فسفات‌ها میزان pH آن ۷ تنظیم می‌شود، تهیه شد (Nweke, et al., 2003) سپس ۴۵ میلی‌لیتر از آن در ارلن‌های ۲۵۰ سی سی ریخته

تصفیه شناسایی شوند. اطلاعات پایه‌ای نظیر: غلظت نفت، دانسیته جمعیت میکروارگانیسم‌های نفت خوار و پتانسیل تجزیه بیولوژیکی جزء عوامل مهمی هستند که می‌باید برای منطقه آلوده به ترکیبات نفتی اندازه‌گیری شوند. عوامل دیگری که در بازدهی این روش مؤثر هستند، عبارتند از: تخلخل زمین، مقدار اکسیژن موجود در حفره‌ها، مواد مغذی برای رشد میکروارگانیسم‌ها (فسفر و نیتروژن)، دمای محیط و pH محیط است. بنابراین در تحقیق حاضر در راستای بررسی فرایندهای مؤثر بر کاهش آلودگی نفتی در ستون خاک و بهینه سازی این فرایندها، مطالعه بر روی روش تجزیه بیولوژیکی صورت گرفته و با جداسازی میکرب‌های تجزیه ترکیبات PAH از خاک منطقه پالایشگاه تهران و انتخاب کنسرسيوم میکربی مناسب و استفاده از مواد غذایی مختلف، عملیات بهینه سازی انجام گرفت. پالایشگاه تهران واقع در محله باقرشهر در شهرری در جنوب تهران واقع شده است. با توجه به نقشه ۲۵۰۰۰: ۱ شهرری، شرکت پالایش نفت تهران حدوداً در موقعیت جغرافیایی ۵۱ ۲۵ ۱۰ طول شرقی و ۳۵ ۳۲ ۳۰ عرض شمالی قرار دارد. در گذشته این بخش در میان روستاهای اطراف که در تأمین مایحتاج کشاورزی آن نقش داشتند، موقعیت ممتازی داشت.

در حال حاضر کوره‌پزخانه‌ها، کارگاه‌های سنگ‌بری و تولید مصالح ساختمانی، انبارهای وسیع و بزرگ کالاهای وارداتی، توقفگاه‌ها و تعمیرگاه‌ها، واحدهای کوچک صنایع مصرفی و مجتمع‌های بزرگ صنعتی مانند پالایشگاه نفت و کارخانه سیمان در محل مزارع سابق وجود دارند (ریاحی، ۱۳۷۶). در تحقیق حاضر برای کاربرد روشهای مقرون به صرفه، ساده و با بازدهی بالا برای کاهش هیدروکربورهای نفتی در خاک آلوده پالایشگاه تهران مطالعه‌ای بر روی روش تجزیه بیولوژیکی صورت گرفت.

مواد و روش بررسی

نمونه برداری از خاک و بررسی خصوصیات فیزیکی شیمیایی

خاک منطقه

عملیات نمونه برداری از خاک زمین پشت پمپ بنزین پالایشگاه تهران با استفاده از دستکش و قاشق استریل از خاک سطحی در عمق ۰-۲۰ سانتیمتری به روش مرکب انجام گرفته و نمونه‌ها در فانل‌های استریل بر روی یخ در کمتر از ۲ ساعت به آزمایشگاه منتقل شد. شایان ذکر است؛ از آنجایی که زمین مورد نظر دارای بافت هتروژنی است، عملیات نمونه برداری در ۴ جهت مختلف جغرافیایی و مرکز این زمین صورت گرفت و مشخصات

دما: ۲۵، ۳۰ و ۳۷ درجه سانتیگراد pH؛ ۶-۶/۵-۷-۷/۵-۸، موادغذایی؛ منبع کربن از اوره، نترات آمونیوم و سولفات آمونیوم و منبع فسفر از پتاسیم دی هیدروژن فسفات به نسبت C:N:P: ۱:۱۰:۱۰۰:۵:۱:۱۰۰:۵:۱:۱۰۰:۰.۲:۱:۱۰۰. در پایان با مقایسه میزان O.D. اندازه‌گیری شده بهترین شرایط برای تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH با میکروارگانیسم‌های مذکور به دست آمد.

تیمارهای مورد آزمایش در تجزیه بیولوژیکی نمونه‌های خاکهای آلوده پالایشگاه تهران

در این بخش سه تیمار مختلف به همراه یک کنترل برای مقایسه روش بیولوژیکی به صورت طبیعی (شاهد)، تحریک میکربی و افزایش میکربی تهیه شد. بنابراین در ابتدا از آنجایی که آلودگی در منطقه مورد مطالعه قدیمی بود، خاکهای مورد آزمایش با سوبسترای نفتی به میزان مشخص اسپری شده، به طوری که میزان کل کربن آلی در خاک به میزان ۲ درصد رسید.

سپس ۵۰۰ گرم از نمونه‌های خاک در بشرهای استریل یک لیتری ریخته شد و تیمار تحریک میکربی با افزایش سولفات آمونیوم و پتاسیم دی هیدروژن فسفات به نسبت C:N:P: ۱:۱۰:۱۰۰ و تیمار افزایش میکربی علاوه بر شرایط فوق کنسرسيوم میکربی از ۵ عدد از باکتری‌هایی که بیشترین رشد را داشتند نیز تلقیح شد. به طوری که جمعیت میکربی در خاک این تیمار به میزان 10^8 باکتری در گرم خاک رسید.

تیمار شاهد نیز بدون افزایش مواد غذایی و میکروارگانیسم به منظور بررسی روش بیولوژیکی به صورت طبیعی تهیه شد. خاک نمونه کنترل نیز سه مرتبه در اتوکلاو ۱۲۱ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه استریل شد. در بشرهای با فویل آلومینیومی استریل بسته شده و تیمارها به مدت ۴ هفته در انکوباتور ۳۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. هر هفته با زیر و رو کردن خاک، نمونه‌ها هوادهی شده و با افزایش ۲۰ میلی لیتر آب مقطر استریل در حد ۶۰ درصد اشباع تنظیم شدند. خاک تیمارها هر هفته به مدت ۴ هفته برای اندازه‌گیری جمعیت میکربی و میزان ترکیبات PAH در آنها نمونه برداری شدند.

تجزیه و تحلیل‌های آماری

برای انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS از مدل آماری تحلیل واریانس یکطرفه (One-way ANOVA) و تست LSD استفاده شد تا بدین وسیله نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مربوط به تیمارهای مورد بررسی با یکدیگر

شده و در اتوکلاو به مدت ۱۵ دقیقه استریل شد. در ادامه در شرایط کاملاً استریل ۵ گرم از نمونه‌های خاک به همراه ۵۰۰ میکرو لیتر از آلاینده نفتی (سوبسترا) به آنها اضافه شد و به مدت ۴۸ ساعت در شیکر انکوباتور با دور ۱۸۰ در دقیقه و دمای ۳۷ درجه سانتیگراد قرار داده شد (Hilyard, et al., 2008 ; Meyer, et al., 1999).

بعد از ۴۸ ساعت نمونه‌ها از شیکر انکوباتور خارج شده و در شرایط استریل یک میلی لیتر از آنها بر روی پلیت‌های حاوی محیط کشت Oil broth که با افزایش ۲-۱/۵ درصد آگار - آگار جامد شده بود به صورت پورپلیت کشت داده شد و سطح پلیت‌ها با سوبسترای نفتی اسپری شد.

پلیت‌ها برای رشد میکروارگانیسم‌ها بر روی آنها به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از انکوباتور خارج شد و برای ادامه آزمایش‌ها خالص سازی میکربی استفاده شد.

شایان ذکر است برای غنی سازی میکربی یک میلی لیتر از باقیمانده محلول‌های داخل ارلن‌ها به ظروف جدید حاوی محیط کشت Oil broth و سوبسترای تازه اضافه و این عملیات تا ۳ مرحله ادامه داده شد (Hilyard, et al., 2008 ; Meyer, et al., 1999).

در پایان با استفاده از تست‌های مختلف بیوشیمیایی شناسایی باکتری‌های خالص سازی شده صورت گرفت.

بهینه سازی شرایط مؤثر بر رشد میکروارگانیسم‌های نفت‌خوار

برای به دست آوردن شرایط بهینه برای رشد میکروارگانیسم‌های نفت‌خوار ابتدا باکتری‌های جداسازی شده از خاک به میزان 10^{-7} سلول در ارلن‌های جداگانه در حضور ۱۰ میلی لیتر محیط پایه معدنی استریل و نسبت‌های متفاوت سوبسترای نفتی شامل ۱٪، ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ به مدت ۲۴ ساعت در شیکر انکوباتور در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و دور ۱۸۰ در دقیقه رشد داده شد و پس از جداسازی فاز نفتی به وسیله ۵ میلی لیتر هگزان نرمال میزان رشد میکروارگانیسم‌ها بر حسب دانسیته نوری 10^8 با دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۵۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. سپس ۵ عدد از باکتری‌هایی که بیشترین رشد را داشتند انتخاب شده و آزمایش‌های مذکور با تغییر در مشخصه‌های دما، pH تغییر در نوع ماده غذایی و نسبت C:N:P تکرار شد (Hilyard, et al., 2008). محدوده مشخصه‌های مذکور به قرار زیر است:

اولیه خاک نسبت به ترکیبات PAH نیز ۴۰۶/۵ میکروگرم بر کیلوگرم برآورد شده است. شایان ذکر است همان طور که قبلاً ذکر شد از آنجایی که آلودگی در منطقه مورد مطالعه قدیمی بود، خاکهای مورد آزمایش با سوبسترای نفتی به میزان مشخص اسپری شد، به طوری که مجموع ترکیبات PAH در خاک مورد آزمایش در تیمارها به میزان ۲۱۱۱ میکروگرم بر کیلوگرم رسید.

مقایسه شده و بهترین تیمار انتخاب شود (Steel and Torrie, 1980).

نتایج

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده برای اندازه‌گیری مشخصه‌های فیزیکوشیمیایی خاک منطقه که در جدول شماره (۱) مشاهده می‌شود، خاک مورد استفاده در مطالعات دارای بافت رسی، pH ۷/۴۱ و رطوبت اشباع ۲۹/۹۶ است. میزان آلودگی

جدول شماره (۱): مقادیر میانگین حاصل از آزمایش‌ها تعیین خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک منطقه

شماره نمونه	فسفر mg/kg	ازت %	بافت خاک	CEC meq/l	مواد آلی %	رطوبت اشباع %	pH (1:1)
۱	۲۰/۳	۰/۱۴	رسی - لومی	۵۲/۳	۰/۶۰۷	۲۷/۶۸۶	۷/۲۲
۲	۱۹/۳	۰/۱۳	رسی - لومی	۵۱/۵	۱/۱۰۲	۳۰/۴۶۷	۷/۲۵
۳	۱۸/۲	۰/۱۳	رسی	۵۱/۱	۰/۸۰۲	۳۰/۷۶۹	۷/۴۲
۴	۱۵/۶	۰/۰۸	رسی	۵۲/۱	۰/۸۴۰	۳۰/۸۸۴	۷/۴۹
۵	۲۰/۳	۰/۱۳	رسی	۵۲/۴	۰/۵۸۱	۲۷/۳۶۴	۷/۶۴
مخلوط	۲۰/۱	۰/۱۳	رسی	۵۲/۱	۰/۷۳۴	۲۹/۹۶۸	۷/۴۱

pH را بر رشد میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده ترکیبات PAH نشان می‌دهند. همچنین نمودارهای شماره (۴) الی (۶) اثر نسبت‌های مختلف C:N:P و منابع مختلف نیتروژن (اوره، سولفات آمونیوم و نترات آمونیوم) بر رشد باکتریایی را نشان می‌دهند. همان طور که قبلاً ذکر شد، با توجه به بهترین شرایط به دست آمده برای رشد میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده ترکیبات PAH، تیمارهایی برای مقایسه روش بیولوژیکی به صورت طبیعی (شاهد)، تحریک میکربی و افزایش میکربی طراحی شد، به طوری که مقایسه تغییرات درصد تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH نسبت به زمان در این تیمارها در نمودار شماره (۷) و بررسی تغییرات جمعیت باکتری‌های نفت‌خوار نسبت به زمان در نمودار شماره (۸) به نمایش گذاشته شده است. بر اساس این نمودارها نتیجه‌گیری می‌شود حداکثر رشد باکتریایی در نسبت ۲۰ درصد آلاینده نفتی مشاهده شده و افزایش بیشتر سوبسترای نفتی به علت ایجاد سمی بودن تأثیر منفی بر رشد این باکتری‌ها دارد.

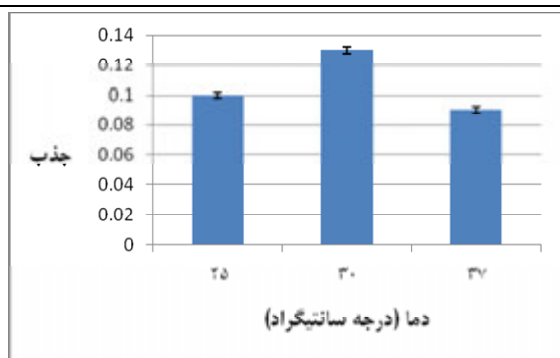
بحث و نتیجه‌گیری

بهینه سازی شرایط مؤثر بر رشد میکروارگانیسم‌های نفت‌خوار
با توجه به نمودار شماره (۱) نتیجه‌گیری می‌شود حداکثر رشد باکتریایی در نسبت ۲۰ درصد آلاینده نفتی مشاهده شده و افزایش بیشتر سوبسترای نفتی به علت ایجاد سمی بودن تأثیر منفی بر رشد این باکتری‌ها دارد. همچنین نمودار شماره (۲) نشان می‌دهد که در

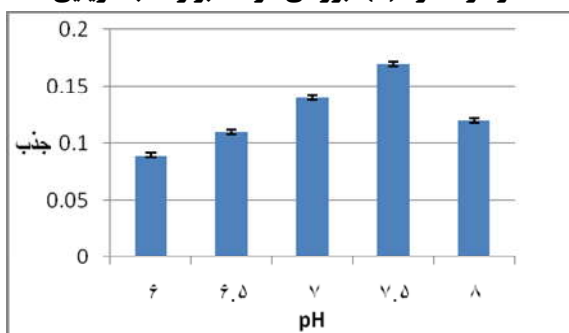
عملیات غنی‌سازی تا سه مرحله انجام شد و افزایش کدورت در ارلن‌هایی که حاوی سوبسترای نفتی بودند در مقایسه با ارلن‌های کنترل نشانه رشد میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده ترکیبات PAH بود. پس از انتقال مجموعه‌های رقیق شده مربوط به نتایج غنی‌سازی بر روی پلیت‌های حاوی محیط کشت Oil broth و اسپری کردن آنها با سوبسترای نفتی، ملاحظه رشد کلنی‌های باکتریایی که دارای هاله شفاف در اطراف خود بودند، در مقایسه با پلیت‌های کنترل، امکان انتخاب و جداسازی باکتری‌های تجزیه‌کننده ترکیبات PAH فراهم شد.

کلنی‌هایی که دارای اشکال متفاوتی بودند در محیط‌های مایع حاوی محیط کشت Oil broth و سوبسترای نفتی تلقیح شدند و اندازه‌گیری و افزایش در میزان O.D. نشان دهنده افزایش روند تجزیه ترکیبات PAH بود. ۵ عدد از باکتری‌هایی که بالاترین توانایی تجزیه ترکیبات PAH را داشتند برای تهیه کنسرسيوم میکربی و شناسایی، انتخاب شدند که نتایج تست‌های مختلف بیوشیمیایی نشان داد که گونه‌های باکتری‌های جداسازی شده متعلق به ۳ گونه مختلف از *Pseudomonas sp* و گونه‌های *Bacillus sphaericus* و *Micrococcus sp* هستند.

نمودار شماره (۱) نشان‌دهنده تأثیر نسبت‌های متفاوت سوبسترای نفتی بر رشد میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده ترکیبات PAH بوده و نمودارهای شماره (۲) و (۳) نیز به ترتیب اثر دما و



نمودار شماره (۲): بررسی اثر دما بر رشد باکتریایی



نمودار شماره (۳): بررسی اثر میزان pH بر رشد باکتریایی

(منبع: نگارندگان)

همان‌طور که متذکر شدیم، هیدروکربن‌های نفتی دارای غلظت‌های بسیار کمی از ترکیبات معدنی هستند و با وارد شدن آنها به خاک نسبت کربن به نیتروژن و کربن به فسفر تا حدی زیاد می‌شود و در نتیجه رشد میکروارگانیسیم‌ها در این شرایط محدود می‌شود. تنظیم و تعدیل نسبت کربن به نیتروژن و کربن به فسفر به فرم تقویت‌کننده‌ها نظیر اوره، سولفات آمونیوم، پتاسیم هیدروژن فسفات و ... که سبب تحریک و افزایش تجزیه بیولوژیکی نفت خام و هیدروکربن‌های اختصاصی دیگر می‌شود، بستگی دارد (Dibble and Bartha, 1979). به هر حال استفاده از مواد تقویت‌کننده برای حذف آلودگی نفتی مؤثر و مفید بوده و بهینه‌سازی نوع و مقدار مواد افزودنی که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد، مبحثی است که محققان باید بررسی و تکمیل کنند (Zhou and Crawford, 1995; Ting, et. al., 1999; Sarkar, et al., 2005).

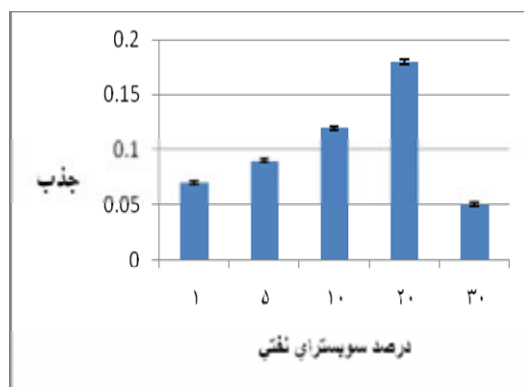
با مروری بر تحقیقات گذشته مشخص می‌شود که محققان مختلف نسبت‌های متفاوتی را برای نسبت N:P ارائه داده‌اند، و در این زمینه توافق نظر کاملاً مشخصی وجود ندارد. پس از آنجایی که ارگانیسیم‌های مختلف، نوع و میزان متفاوتی از نیتروژن و فسفر را نیاز دارند، لازم است در بررسی فرایند تجزیه بیولوژیکی نسبت و

دما ۳۰ درجه سانتیگراد بیشترین رشد باکتریایی مشاهده می‌شود. این نتایج تأییدی است بر یافته‌های محققان پیشین همچون Olivera و همکاران (Olivera, et al., 2003).

آنها عنوان کردند که ارتباط مستقیمی بین کاهش درصد تجزیه بیولوژیکی و کاهش دما وجود دارد و این در حالی است که افزایش دما باعث افزایش نرخ سوخت‌وساز هیدروکربورها تا حداکثر می‌شود. بنابراین همچنان که قبلاً بیان شد؛ دما از طریق اثر بر روی طبیعت فیزیکی و شیمیایی نفت و نیز سرعت کاتابولیسم هیدروکربن و میزان اکسیژن بر تجزیه بیولوژیکی آلودگی نفتی اثر می‌گذارد (Dibble and Bartha, 1979).

در دماهای پایین فعالیت آنزیم‌ها بسیار کم می‌شود و با افزایش دما در محدوده ۲۵ تا ۴۰ درجه سانتیگراد متابولیسم هیدروکربن‌ها افزایش یافته و باکتری‌های بسیاری در این محدوده قادر به رشد و تجزیه بیولوژیکی هیدروکربن‌ها هستند و در دماهای بالاتر به‌خاطر آثار سمی هیدروکربن‌ها روی غشای میکروارگانیسیم‌ها، تجزیه آلودگی نفتی کاهش می‌یابد.

همان‌طور که قبلاً بیان شد، تعیین و کنترل pH خاک در بهینه‌سازی سرعت فرایند تجزیه بیولوژیکی با میکروارگانیسیم‌ها ضروری است (Olivera, et al., 2003). با توجه به نمودار شماره (۳) که اثر تغییرات pH بر میزان رشد باکتریایی را نشان می‌دهد، مشخص می‌شود. حداکثر رشد باکتریایی در شرایط آزمایش‌ها انجام شده در pH ۷/۵ مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در pH حدود خنثی، فعالیت میکروارگانیسیم‌های فوق بهتر صورت می‌گیرد.



نمودار شماره (۱): بررسی اثر میزان آلاینده‌های نفتی بر رشد

باکتریایی (منبع: نگارندگان)

الگوی تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH در تیمارهای مورد

بررسی

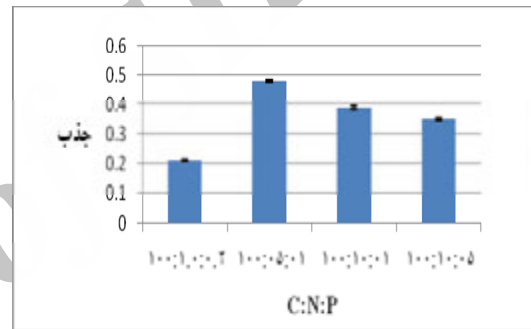
با استفاده از رابطه زیر درصد تجزیه بیولوژیکی در تیمارهای مختلف محاسبه شد:

[میزان ترکیبات PAH در نمونه کنترل - میزان ترکیبات PAH در تیمار مورد بررسی] / میزان ترکیبات PAH در نمونه کنترل $\times 100$

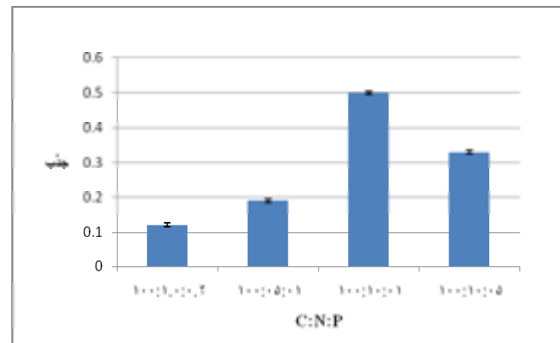
مقایسه تغییرات درصد تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH نسبت به زمان در تیمارهای مورد بررسی در نمودار شماره (۷) به نمایش گذاشته شده است. بر اساس این نتایج میزان تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH، زمانی که از تجزیه بیولوژیکی به روش افزایش میکربی استفاده شده است بین ۵۸/۲ تا ۷۰/۵ درصد مشاهده شده است. این در حالی است که تأثیر روش تحریک میکربی بین ۳۲/۱ تا ۴۵/۷ و اثر تجزیه بیولوژیکی به روش طبیعی بین ۲۲/۹ تا ۳۷/۲ درصد بوده است. همچنین با توجه به این نمودار میزان تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH در تمامی تیمارها با توجه به افزایش زمان انکوباسیون افزایش یافته و حداکثر تجزیه بیولوژیکی این ترکیبات در هفته چهارم در تیمار افزایش میکربی ۷۰/۵ درصد و در تحریک میکربی ۴۵/۷ درصد و در روش تیمار شاهد (طبیعی) ۳۷/۲ درصد بوده است. همچنان که قبلاً ذکر شد، برای انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری از مدل آماری تحلیل واریانس یکطرفه استفاده شد تا تفاوت بین روند تغییرات غلظت ترکیبات PAH و توانایی حذف این ترکیبات در خاک در تیمارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده و بهترین تیمار انتخاب شود.

با توجه به نتایج آزمون آماری مشخص شد، در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ و احتمال ۹۵ درصد ($p < 0.05$) اختلاف معنی‌داری بین تیمار افزایش میکربی و دو تیمار دیگر وجود دارد که نشان‌دهنده آن است که افزایش کنسرسیوم باکتری‌های انتخاب شده سرعت تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH در خاک را افزایش می‌دهد. شایان ذکر است این نتایج با نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران قبلی همچون Sarkar و همکاران (2005); (Bento, et al., 2005) Cheney, et al., 2009 که در سال ۲۰۰۹ انجام یافته است، مطابقت داشته و مبین آن است که روش تأثیر افزایش همزمان مواد غذایی و تلقیح جمعیت میکربی مناسب به خاک‌های آلوده به مواد نفتی مؤثرتر از افزایش مواد غذایی مورد نیاز میکروارگانیسم‌هاست. همچنین نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری نشان داد که تفاوت

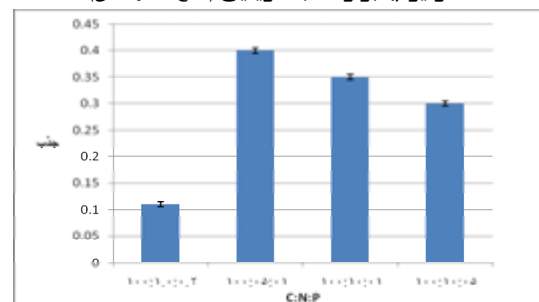
نوع ماده غذایی بهینه مورد بررسی قرار گیرد (Zhou and Crawford, 1995; Ting, et al., 1999; Sarkar, et al., 2005). با توجه به نمودارهای شماره (۴ تا ۶) که اثر نسبت‌های مختلف C:N:P و منابع مختلف نیتروژن (اوره، سولفات آمونیوم و نیترات آمونیوم) بر رشد باکتریایی را نشان می‌دهد، مشخص می‌شود؛ بهترین نسبت C:N:P برای اوره، نیترات آمونیوم و سولفات آمونیوم به ترتیب ۱:۵:۱۰۰، ۱:۵:۱۰۰ و ۱:۱۰:۱۰۰ است. بنابراین سولفات آمونیوم و پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات به نسبت C:N:P ۱:۱۰:۱۰۰ به‌عنوان منبع نیتروژن و فسفر در تیمارهای مورد بررسی اعمال شد.



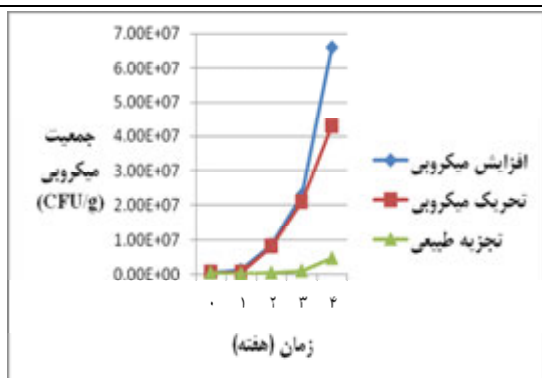
نمودار شماره (۴): بررسی اثر میزان مواد غذایی (اوره) بر رشد باکتریایی (منبع: نگارندگان)



نمودار شماره (۵): بررسی اثر میزان مواد غذایی (سولفات آمونیوم) بر رشد باکتریایی (منبع: نگارندگان)



نمودار شماره (۶): بررسی اثر میزان مواد غذایی (نیترات آمونیوم) بر رشد باکتریایی (منبع: نگارندگان)



نمودار شماره (۸): مقایسه تغییرات جمعیت باکتری‌های

نفت خوار نسبت به زمان در تیمارهای مختلف (منبع: نگارندگان)

با توجه به نتایج تحقیق حاضر مشخص شد حداکثر رشد باکتریایی در نسبت ۲۰ درصد آلاینده نفتی، pH ۷/۵ و دمای ۳۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود. همچنین با آزمایش بر روی منابع متعدد غذایی و نسبت‌های مختلف C:N:P مشخص شد بهترین نسبت C:N:P برای اوره، نیترات آمونیوم و سولفات آمونیوم به ترتیب ۱:۵:۱، ۱:۵:۱ و ۱:۱۰:۱ است. همچنین نتایج نشان داد، روش تجزیه بیولوژیکی قادر است در تیمارهای مورد آزمایش در مدت ۴ هفته بین ۳۲/۱ تا ۷۰/۵ درصد روند کاهش آلاینده‌های نفتی را در خاک بهبود بخشد. بنابراین، استفاده از روش بیولوژیکی برای پاکسازی هیدروکربن‌های نفتی در خاک به دلیل سادگی اجرا، توانایی کاربرد در بسیاری از مناطق، مقرون به صرفه بودن و حذف کامل آلودگی بسیار مناسب بوده و با توجه به تنوع هیدروکربن‌های نفتی در خاک‌های آلوده، پیشنهاد می‌شود، تحقیقات مشابهی در سایر پالایشگاه‌های نفتی بر روی جداسازی و بهینه‌سازی شرایط کشت میکروارگانیسم‌های طبیعی که توانایی آنزیمی بیشتری از میکروارگانیسم‌های دیگر دارند، انجام گیرد.

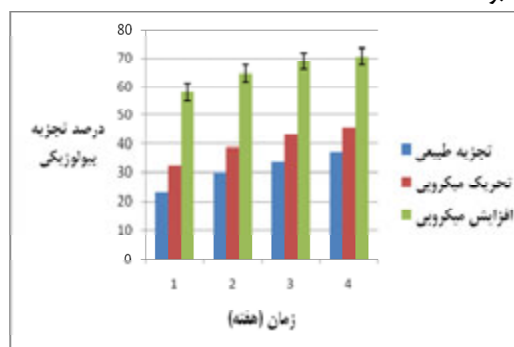
تشکر و قدردانی

تحقیق حاضر از نظر مالی به‌وسیله شرکت پالایش نفت تهران حمایت شده است و نویسندگان بدین‌وسیله از مدیریت عامل محترم این شرکت و مدیر محترم اداره پژوهش و توسعه این شرکت و سایر پرسنل محترم این اداره کمال تشکر و قدردانی را به‌عمل می‌آورند.

یادداشت‌ها

- 1-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)
- 2-Natural Attenuation
- 3-Biostimulation
- 4-Bioventing
- 5-Bioaugmentation
- 6-Landfarming

معنی‌داری ($p < 0.05$) بین سرعت تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH در تیمار تحریک میکروبی و تجزیه بیولوژیکی طبیعی وجود ندارد، به این مفهوم که؛ افزایش مواد غذایی بتنهایی اثر معنی‌داری بر سرعت تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH در خاک ندارد. همچنین نمودار شماره (۷) نشان‌دهنده آن است که اگرچه میزان تجزیه بیولوژیکی ترکیبات PAH در تمامی تیمارها، با توجه به افزایش زمان انکوباسیون افزایش یافته است ولی بیشترین سرعت تجزیه بیولوژیکی این ترکیبات در هفته اول مشاهده شده است. این مطلب را می‌توان این‌طور توجیه کرد که ابتدا میکروارگانیسم‌های نفت‌خوار مصرف تجزیه ترکیبات آلی سبک‌تر افزایش یافته سرعت تجزیه بیولوژیکی بالایی در پی دارد و با گذشت زمان و کاهش در ترکیبات PAH سبک‌تر، روند تجزیه بیولوژیکی آلاینده نیز کاهش می‌یابد. این مطلب با توجه به بررسی تغییرات جمعیت باکتری‌های نفت‌خوار نسبت به زمان که در نمودار شماره (۸) ارائه شده است تأیید می‌شود. نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری نیز مبین آن است که در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ و احتمال ۹۵ درصد ($p < 0.05$) اختلاف معنی‌داری بین جمعیت باکتری‌های تجزیه‌کننده ترکیبات PAH در تیمار افزایش میکروبی و دو تیمار دیگر وجود داشته اما اختلاف جمعیت باکتریایی بین تیمار تحریک میکروبی و تیمار شاهد معنی‌دار نیست. همچنین با توجه به نمودار شماره (۸) بیشترین سرعت رشد باکتریایی در هفته اول انکوباسیون مشاهده شده و این در حالی است که در تیماری که از تجزیه بیولوژیکی به روش افزایش میکروبی استفاده شده است، حداکثر جمعیت باکتریایی مشاهده می‌شود. در مجموع نتایج نشان‌دهنده آن است که افزایش جمعیت باکتریایی با کاهش غلظت ترکیبات PAH به‌طور هم‌زمان، در ارتباط بوده است.



نمودار شماره (۷): مقایسه تغییرات درصد تجزیه بیولوژیکی

ترکیبات PAH نسبت به زمان در تیمارهای مختلف

(منبع: نگارندگان)

10-Bioaugmentation

11-Vacuum bottom

12-Optical density (OD)

7-Composting

8-Phytoremediation

9-Biostimulation

منابع مورد استفاده

- ریاحی، م.ع. ۱۳۷۶. تشخیص محل آلودگی نفتی خاک و اثرگذاری آن روی منبع آب منطقه کهریزک تهران، سمینار حفاظت از منابع آب آشامیدنی.
- مرکز تحقیقات آب و خاک. ۱۳۸۰. دستور کار آزمایش‌های خاک .
- Bento, F.M., et al .2005. Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation., *Bioresource Technol.* 96: 1049-1055.
- Cheney, M.A., et al .2009. A comparative study on the uptake of poly aromatic hydrocarbons by *Anodonta californiensis*., *Environ. Pollut.* 157: 601-608
- Dibble, J.T. , R., Bartha .1979. Effect of environmental parameters on the biodegradation of oil sludge., *Appl. and Environ. Micro.* 37: 729-739.
- Hilyard, E.J., et al .2008. Enrichment, Isolation, and Phylogenetic Identification of Poly Aromatic Hydrocarbon-Degrading Bacteria from Elizabeth River Sediments., *Appl. Environ. Micro.* 74: 1176-1182.
- Meyer, S., et al .1999. Differential detection of key enzymes of poly aromatic-hydrocarbon-degrading bacteria using PCR and gene probs., *Microbiology.* 145: 1731-1741.
- Nweke, C.O., G.C., Okpokwasili, .2003. Drilling fluid base oil biodegradation potential of a soil *Staphylococcus* species. *Afr J Biotechnol.* 2 (9): 293-295.
- Olivera, N. L., et al .2003. Microbial characterization and hydrocarbon biodegradation potential of natural bilge waste microflora., *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 30(9): 542-548
- Samimi, S.V., R., Akbari Rad, and F., Ghanizadeh .2009. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons contamination level in collected samples from vicinity of a highway., *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.* 6(1): 41-52.
- Sarkar, D., et al .2005. Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: Comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation., *Environ. Pollut.* 136: 187-195.
- Shojaosadati, S.A., S., Hashemi Najafabadi .2002. Bioremediation of Hydrocarbon Polluted Soil., *Int. J. Eng. Sci.* 13-18
- Steel, R.G., J.H., Torrie .1980. Principle and procedures of statistics, McGraw-Hill Book Co., New York.,
- Ting, Y.P., et al .1999. Bioremediation of petroleum hydrocarbons in soil microcosms. *Resource. Environ. Biotechnol.* 2: 197-218.
- Zhou, E. , R., Crawford. 1995. Effect of oxygen, nitrogen, and temperature on gasoline biodegradation in soil., *Biodegradation.* 6: 127-140.