

بررسی تغییرات غلظت هیدروکربن‌های نفتی در اعماق مختلف خاک آلوده بعد از فرایند گیاه‌پالایی

فریदा ایرجی آسیابادی^{۱*}، سید احمد میرباقری^۲، پیام نجفی^۳، فرامرز معطر^۴

۱. دکتری علوم محیط زیست، گروه محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی

واحد اصفهان (خوراسگان)

۲. استاد، دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی

خواجه نصیرالدین طوسی

۳. دانشیار، دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد

اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۴. استاد، دکتری شیمی، گروه محیط زیست، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم

و تحقیقات، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۱/۲۷)

چکیده

هیدروکربن‌های نفتی از مهم‌ترین آلاینده‌های آلی محیط زیست‌اند که به دلیل سمی بودن و سرطان‌زایی، وجود آن‌ها در طبیعت، نگرانی‌های بسیاری را سبب شده است. هدف از پژوهش حاضر کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی در خاک اطراف پالایشگاه اصفهان، با استفاده از گیاهان سورگوم (*Sorghum vulgare*) و جو (*Hordeum vulgare*) و بررسی تغییرات غلظت هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت در اعماق مختلف خاک پس از فرایند گیاه‌پالایی بود. برای این کار از لوله‌های پلیکا به طول ۱۳۰ و قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر به‌منزله گلدان استفاده شد. بذر گیاهان جو و سورگوم در عمق ۱ تا ۲ سانتی‌متری سطح گلدان‌ها کشت شدند و پس از گذشت ۱۳ هفته از کاشت گیاهان، نمونه خاک برای تعیین غلظت هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت از اعماق ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متری تیمارهای مختلف برداشت شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، هر دو گیاه برای کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی خاک مؤثرند به طوری که درصد کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی خاک ۲۳-۳۵ درصد بیشتر از تیمار بدون گیاه بود البته این کاهش تا عمق نفوذ ریشه مشاهده شد و برای اعماق بیشتر خاک، تعداد باکتری نفت‌خوار کم و غلظت هیدروکربن‌های نفتی افزایش داشت. بنابراین، باید در مورد خاک‌هایی که عمق آلودگی زیاد دارند، اقدامات مناسب دیگری نظیر زمین‌پالایی، تزریق و تحریک میکروارگانیسم‌های نفت‌خوار انجام پذیرد.

کلیدواژه‌گان: پالایش، جو، سورگوم، عمق، هیدروکربن نفتی.

۱. مقدمه

انسان بر اثر فعالیت‌های روزمره خود، مقادیر قابل توجهی از آلاینده‌های مختلف را به منابع آب، خاک و هوا وارد می‌کند. برخلاف آب و هوا، آلودگی خاک از نظر ترکیب شیمیایی به آسانی قابل اندازه‌گیری نیست و یک خاک پاک و خالص تعریف‌پذیر نیست. از اواسط سال ۱۹۸۰ آلودگی خاک ناشی از هیدروکربن‌های نفتی به‌منزله یک مسئله بحرانی زیست‌محیطی در دنیا مطرح شد (Baghvand *et al.*, 2011). هیدروکربن‌های نفتی از مهم‌ترین آلاینده‌های آلی محیط زیست‌اند که به دلیل سمی بودن، سرطان‌زایی و ایجاد تغییرات موتاژنتیکی، وجود آن‌ها در طبیعت، نگرانی‌های بسیاری را سبب شده است (Cupers *et al.*, 2002). این آلاینده‌ها با نفوذ در خاک و رسیدن به آب زیرزمینی، گیاه، حیوان و انسان را مسموم می‌کنند. این مسئله به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که محدودیت دسترسی به آب‌های سطحی مناسب وجود دارد، بیشتر جلوه کرده است. علاوه بر این احیای آب‌های زیرزمینی آلوده بسیار طولانی و پرهزینه است بنابراین، حفاظت کیفی از منابع محدود آب زیرزمینی به عنوان الزامی در مدیریت منابع آب مناطق خشک مطرح می‌شود. در ایران نیز نشت ترکیبات نفتی از لوله‌های زیرزمینی، مخازن نگهداری و حوضچه‌های تبخیر پالایشگاه‌ها منجر به آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی این مناطق به هیدروکربن‌های نفتی شده است. بنابراین، بررسی و مطالعه روش‌های کاهش میزان غلظت آلاینده‌های نفتی در ستون خاک این مناطق، قبل از رسیدن به سفره آب زیرزمینی ضروری است. روش‌های فیزیکی و شیمیایی متعددی برای مقابله با آلودگی‌های نفتی در خاک وجود دارد که بسیاری از آن‌ها به سبب هزینه بالا و آثار جانبی مضر، کمتر استفاده می‌شوند. به همین دلیل در سال‌های اخیر به روش‌های زیستی توجه بیشتری شده است (Siddiqui & Adams, 2001). در میان روش‌های زیستی، گیاه‌پالایی در حذف آلودگی نفتی بازدهی خوبی دارد و مطالعه فراوان شده است (Lu *et al.*, Zhineng *et al.*, 2010).

(2010; Diab, 2008). در این روش از گیاهان مقاوم برای حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌های نفتی در خاک استفاده می‌شود. گیاهان با دقت زیاد و به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که از بیشترین جوانه‌زنی، رشد، توسعه و سطح ویژه ریشه برخوردار باشند (Adam & Duncan, 2002)، حتی‌المقدور از گیاهان بومی و نسبت به شرایط خاک منطقه سازگار باشند و امکان تکمیل دوره رشد آن‌ها در شرایط آلودگی وجود داشته باشد (Moslehi Moslehabadi *et al.*, 2011). در این پژوهش از دو گونه گیاهی ورگوم و جو برای کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی خاک استفاده شد. گیاه سورگوم از خانواده گندمیان، توانایی رشد و سازش با شرایط اقلیمی مختلف، نظیر آب و هوای گرم و خشک را دارد و توانایی حذف آلاینده‌های آلی ناشی از ترکیبات نفتی را به‌خوبی داراست (McCatcheeon & Schnoor, 2003). همکاران (Alaie *et al.*, 2011) نشان دادند که یاه سورگوم پس از ۱۶ هفته، میزان حذف آلاینده فنانترون در خاک را تا ۲۰ درصد افزایش داده است. جو نیز گیاهی مقاوم از خانواده گراس‌هاست که توانایی بالایی برای ایجاد سازگاری با شرایط محیطی دارد و تراکم بالای ریشه‌های آن در کاهش هیدروکربن‌های نفتی خاک بسیار کارآمد عمل می‌کند (Rangzan & Landi, 2008). Seyed Alikhani و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی اثر رشد گیاهان جو، ماش و لوبیا بر پاک‌سازی هیدروکربن‌های نفتی خاک پالایشگاه نفت شهر ری، نشان دادند که حداکثر نرخ پالایش به میزان ۴۶ درصد، مربوط به گیاه جو است. البته بیشترین تأثیر گیاهان بر کاهش آلودگی خاک در محدوده ریشه (ریزوسفر) است (Lu *et al.*, 2010). علت این امر افزایش تعداد باکتری‌ها در محدوده ریشه است (Moreira *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2012). هدف از این پژوهش کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی در خاک اطراف پالایشگاه اصفهان، با استفاده از گیاهان سورگوم (*Sorghum vulgare*) و جو (*Hordeum vulgare*) و بررسی تغییرات غلظت هیدروکربن‌های نفتی و باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت در اعماق مختلف خاک پس از فرایند گیاه‌پالایی بود.

شد. بدین منظور نمونه خاک‌ها پس از هوا خشک‌شدن، توسط الک ۲ میلی‌متری الک شدند و بر روی تمام نمونه‌ها با ۳ تکرار، آزمایش‌هایی برای اندازه‌گیری بافت (روش هیدرومتری)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی (Page *et al.*, 1982)، مواد آلی (Walkley & Black, 1934)، نیتروژن کل (Page *et al.*, 1982)، پتاسیم (Black, 1965)، CEC (Olsen *et al.*, 1952)، فسفر قابل جذب (Olsen *et al.*, 1952)، درصد آهک، رطوبت و تخلخل انجام شد (جدول ۱).

۳.۲. اندازه‌گیری غلظت هیدروکربن‌های نفتی

خاک

به‌منظور تعیین غلظت کل هیدروکربن‌های نفتی (TPHs) و نیز برخی از هیدروکربن‌های چندحلقه‌ای (PAHs) در خاک ابتدا عصاره‌گیری به روش سوکسله با نسبت مساوی آن‌هگزان و دی‌کلرومتان (روش شماره ۸۱۰۰ سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا) انجام شد (Christopher *et al.*, 1988). ترکیبات جداشده در مرحله قبل برای جداسازی حلال و تغلیظ نمونه‌ها، درون روتاری توسط خلأ خشک و تغلیظ شدند، سپس به روش کروماتوگرافی ستونی با استفاده از ستون سیلیکاژل و آلومینا عملیات خالص‌سازی بر روی آن‌ها انجام شد (Samimi *et al.*, 2009) با استفاده از دستگاه GC و به روش ۸۳۱ سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (US. EPA, 1984) غلظت برخی از هیدروکربن‌های چندحلقه‌ای موجود در خاک تعیین شد.

۴.۲. شمارش باکتری‌های نفت‌خوار

برای شمارش باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت خاک، مقدار ۱ گرم خاک در لوله آزمایش حاوی ۹ میلی‌لیتر محلول استریل کلریدسدیم ۹ گرم در لیتر ریخته شد. مخلوط به‌شدت تکان داده شد و از آن رقت‌های سریال (10^{-1} تا 10^{-8}) تهیه شد. سپس سریال‌های رقیق‌شده به محیط کشت انتقال داده شد. پلیت‌ها در انکوباتور به‌مدت ۴۸ ساعت و در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. نمونه‌برداری خاک

با توجه به مشاوره و هماهنگی انجام‌شده با بخش محیط زیست پالایشگاه اصفهان، نمونه‌برداری خاک آلوده از زمین مجاور واحد گوگرد پالایشگاه صورت گرفت و خاک شاهد از خاک غیرآلوده اطراف همان منطقه نمونه‌برداری شد. نظر به اینکه تعداد نمونه‌ها به تغییر خصوصیات خاک بستگی دارد و اطلاعات چندانی در مورد نمونه‌های خاک یادشده وجود نداشت به همین دلیل با توجه به مساحت قسمت آلوده (۲ هزار مترمربع)، در هر ۲۰۰ مترمربع ۴ محل انتخاب و از هر محل در ۴ جهت مختلف جغرافیایی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری شد. از هر ۴ نمونه خاک یک نمونه مرکب تهیه شد. وزن تقریبی هر نمونه برداشتی ۱ تا ۲ کیلوگرم و نمونه مرکب حدود ۴ تا ۸ کیلوگرم بود که از این نمونه ۳ زیرنمونه برداشت شد. نمونه‌ها تا انتقال به آزمایشگاه و در فواصل بین آزمایش در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد حفظ شدند. در مطالعات قبلی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی در ایران، در اغلب موارد آلودگی به‌طور مصنوعی به خاک پاک اضافه شده است ولی رفتار خاک‌هایی که از محل آلوده به ترکیبات نفتی تهیه می‌شوند با خاک‌های تمیزی که در آزمایشگاه به آن‌ها ترکیبات نفتی اضافه می‌شود، هنگام گیاه‌پالایی، کاملاً متفاوت است (Huang *et al.*, 2005) بنابراین، در پژوهش حاضر برای حصول نتایج واقعی‌تر از خاک تهیه‌شده از محل آلوده که بازتاب شرایط واقعی محل آلوده است، استفاده شد.

۲.۲. اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکی

و شیمیایی خاک

با توجه به نقش بسیار مهم ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر کارایی فرایندهای مؤثر بر کاهش هیدروکربن‌های نفتی خاک (Tang *et al.*, 2012) ابتدا برخی از این ویژگی‌ها در آزمایشگاه بررسی

هر گلدان ۲۰ بذر کاشته شد ولی بعد از گذشت ۲ هفته گیاهان ضعیف تر خارج شد. آبیاری برحسب مشاهده وضعیت روزانه گیاهان و به گونه ای که آبی از ته ستون ها خارج نشود، انجام گرفت. در وسط دوره آزمایش به علت زرد شدن برگ های گیاهان و سوختگی انتهای برگ دو نوع کود آهن و نیتروژن به مقدار مساوی به همه تیمارها داده شد. پس از گذشت ۱۳ هفته از کاشت گیاهان (۱۳۹۱/۵/۵) تا (۱۳۹۱/۸/۵)، نمونه خاک برای تعیین غلظت هیدروکربن های نفتی و تعداد باکتری های تجزیه کننده نفت از اعماق ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی متری تیمارهای مختلف برداشت شد. ریشه و اندام هوایی گیاهان مطالعه شده از یکدیگر جدا و در آن با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند تا وزن خشک ریشه و اندام هوایی هر گیاه محاسبه شود.

۳. نتایج

۱.۳. نتایج اندازه گیری برخی از ویژگی های

فیزیکی و شیمیایی خاک

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱، هیدروکربن های نفتی موجود در خاک سبب افزایش میزان EC، افزایش درصد مواد آلی، افزایش نیتروژن کل و کاهش pH خاک می شوند که این عوامل منجر به محدود شدن رشد گیاه در خاک آلوده به مواد نفتی می شود. نتایج حاصل از سنجش غلظت هیدروکربن های نفتی و برخی هیدروکربن های چندحلقه ای خاک آلوده در جدول ۲ نشان داد که خاک مطالعه شده بسیار آلوده و متوسط غلظت هیدروکربن های نفتی در این خاک ۷۵ mg/kg هزار به دست آمد.

۲.۳. نتایج عملکرد ماده خشک گیاه

نتایج آماری تجزیه واریانس در نرم افزار SPSS نمایانگر آن است که نوع گیاه و خاک بر عملکرد ماده خشک ریشه و اندام هوایی اثرگذار بوده است. مقایسه میانگین های وزن خشک اندام هوایی و

سپس کلونی های ایجاد شده شمارش شد. با توجه به میانگین به دست آمده در رقت های مورد نظر تعداد باکتری ها برحسب CFU بر گرم خاک گزارش شد. محیط کشت شامل ۹۹۰ میلی لیتر محلول استریل آگار و $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(0/02)$ ، $\text{FeCl}_3(0/05)$ ، $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(0/2)$ ، $\text{K}_2\text{HPO}_4(1)$ ، $\text{NH}_4\text{NO}_3(1)$ ، $\text{KH}_2\text{PO}_4(1)$ ، در pH برابر ۷ بود و ۱۰ میلی لیتر نفت استریل فیلتر شده (نفت خام تازه پالایشگاه نفت اصفهان) نیز به عنوان تنها منبع کربن به محیط کشت اضافه شد (Soleimani et al., 2010). شمارش باکتری نفت خوار برای اعماق ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی متری ستون خاک انجام شد.

۵.۲. آزمایش گیاه پالایی

برای گیاه پالایی از لوله های پلیکا به قطر دهانه ۲۰ سانتی متر و طول ۱۳۰ سانتی متر که ۲۰ سانتی متر انتهای آن زهکش قرار داشت و برای نمونه برداری نهایی در اعماق ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سوراخ شده بود، استفاده شد. با توجه به جرم حجمی خاک ($2/6 \text{ g/cm}^3$) و حجم لوله های پلیکا، وزن خاک مورد نیاز برای هر گلدان محاسبه شد (۴۵ کیلوگرم). بنابراین، از هر یک از نمونه خاک های شاهد و آلوده، ۴۵ کیلوگرم خاک در گلدان های طراحی شده ریخته شد. کل تیمارهای آزمایش شده شامل شش تیمار با سه تکرار بود که در مجموع ۱۸ ستون خاک را شامل می شد. تیمارهای آزمایش شده عبارت بودند از تیمار خاک آلوده کشت شده با گیاه سورگوم در سه تکرار، تیمار خاک آلوده بدون گیاه در سه تکرار (شاهد منفی)، تیمار خاک شاهد کشت شده با گیاه سورگوم در سه تکرار، تیمار خاک شاهد کشت شده با گیاه جو در سه تکرار، تیمار خاک شاهد بدون گیاه در سه تکرار (شاهد مثبت)، تیمارهای بدون گیاه برای حذف آثار محیطی بر کاهش غلظت آلاینده های نفتی موجود در نظر گرفته شدند. بذر گیاهان جو و سورگوم در عمق ۱ تا ۲ سانتی متری سطح گلدان ها کشت شدند، ۱۰ سانتی متر ابتدای هر گلدان خالی گذاشته شد. در

عملکرد ماده خشک اندام هوایی به ترتیب برای جو و سورگوم در تیمار آلوده نسبت به تیمار شاهد دیده شد. بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی و ریشه در تیمار شاهد برای گیاه سورگوم و کمترین مقدار وزن خشک اندام هوایی و ریشه در تیمار آلوده برای گیاه جو بود (شکل ۱).

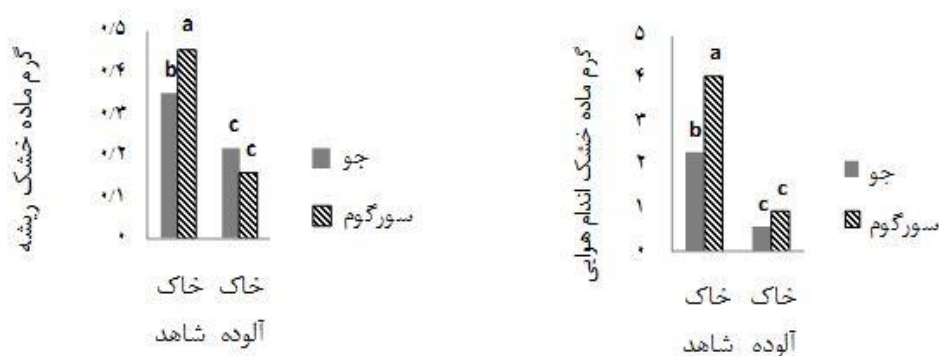
ریشه دو گیاه سورگوم و جو در خاک آلوده نشان داد که وجود هیدروکربن‌های نفتی در خاک موجب کاهش رشد و عملکرد ماده خشک اندام هوایی و ریشه، در مقایسه با تیمار شاهد شده است (شکل ۱). کاهش حدود ۲۰ و ۶۵ درصدی در عملکرد ماده خشک ریشه و کاهش حدود ۵۶ و ۷۷ درصدی در

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک آلوده و شاهد منطقه مطالعه شده

آلوده	شاهد	بافت
Sandy clay loam	Sandy clay loam	pH(۱:۲/۵)
۷/۳	۷/۹	EC(dS/m)
۳/۲	۱/۷	CEC (cmol ⁺ /kg)
۱۰	۸/۲	مواد آلی (درصد)
۴/۷	۰/۸	نیترژن کل (درصد)
۰/۹	۰/۰۷	آهک (درصد)
۲۵	۳۲	رطوبت (درصد)
۳۱	۲۲	تخلخل (درصد)
۵۰	۵۰	فسفر (mg/kg)
۱۹/۸	۴/۵	پتاسیم (mg/kg)
۸۴	۶۵	

جدول ۲. غلظت کل هیدروکربن‌های نفتی و برخی هیدروکربن‌های چندحلقه‌ای خاک آلوده

غلظت (mg/kg)	هیدروکربن نفتی اندازه‌گیری شده
۷۵۰۰۰	کل هیدروکربن‌های نفتی
۴۵	نفتالین
۳۴	فنانترن
۶	آنتراسن
۲۹	فلورانتن
۱۶	پایرن
۰/۴	بنزو k فلورانتن
۰/۷	بنزو α پایرن



شکل ۱. نتایج عملکرد ماده خشک ریشه و اندام هوایی گیاهان سورگوم و جو در تیمارهای شاهد و آلوده

۳.۳. نتایج آزمایش گیاه پالایی

در این مطالعه با استفاده از تجزیه آماری تجزیه واریانس اثر عمق، گیاه و اثر متقابل این دو عامل بر میزان غلظت هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت مشخص شد نتایج این آنالیز در جدول ۳ نشان می‌دهد که تأثیر عمق، گیاه و اثر متقابل این دو عامل بر میزان غلظت هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت در سطح ۱ درصد معنادار است. نتایج آماری مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تفاوت معناداری در سطح ۵ درصد در تیمارهای با گیاه نسبت به تیمارهای بدون گیاه از نظر میزان غلظت هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت وجود دارد. به طوری که در حضور

گونه‌های گیاهی سورگوم و جو میزان کاهش هیدروکربن‌های نفتی ۲۳-۳۵ درصد نسبت به تیمارهای بدون گیاه بیشتر است و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت نیز در حضور گونه‌های گیاهی سورگوم و جو نسبت به تیمارهای بدون گیاه بیشتر بود. نوع گیاه نیز اثر معناداری در سطح ۵ درصد بر کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی خاک و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت داشت. به شکلی که تجزیه و تخریب آلاینده‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت در حضور سورگوم نسبت به جو بیشتر بود. سورگوم و جو به ترتیب سبب کاهش حدود ۶۴ و ۵۲ درصدی غلظت هیدروکربن‌های نفتی نسبت به غلظت اولیه این ترکیبات در شروع دوره آزمایش شدند (جدول ۴).

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس (مقادیر F) اثر گیاه و عمق بر درصد کاهش هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت

مقادیر F			
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین درصد کاهش هیدروکربن‌های نفتی	تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت
گیاه	۲	۳۸۳/۳	۵۵۹
عمق	۳	۲۴۳۴	۵۷۵۷/۷
گیاه * عمق	۶	۹۶/۳	۱۴۰/۷

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های درصد کاهش هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های نفت‌خوار در تیمارهای مختلف گیاهی

حضور گیاه	تعداد باکتری‌های نفت‌خوار	درصد کاهش نفت
سورگوم	۶۰۵۰۰۰ ^{*a}	۶۴ ^a
با گیاه جو	۵۹۰۰۰۰ ^b	۵۲ ^b
بدون گیاه	۴۸۰۰۰۰ ^c	۲۹ ^c

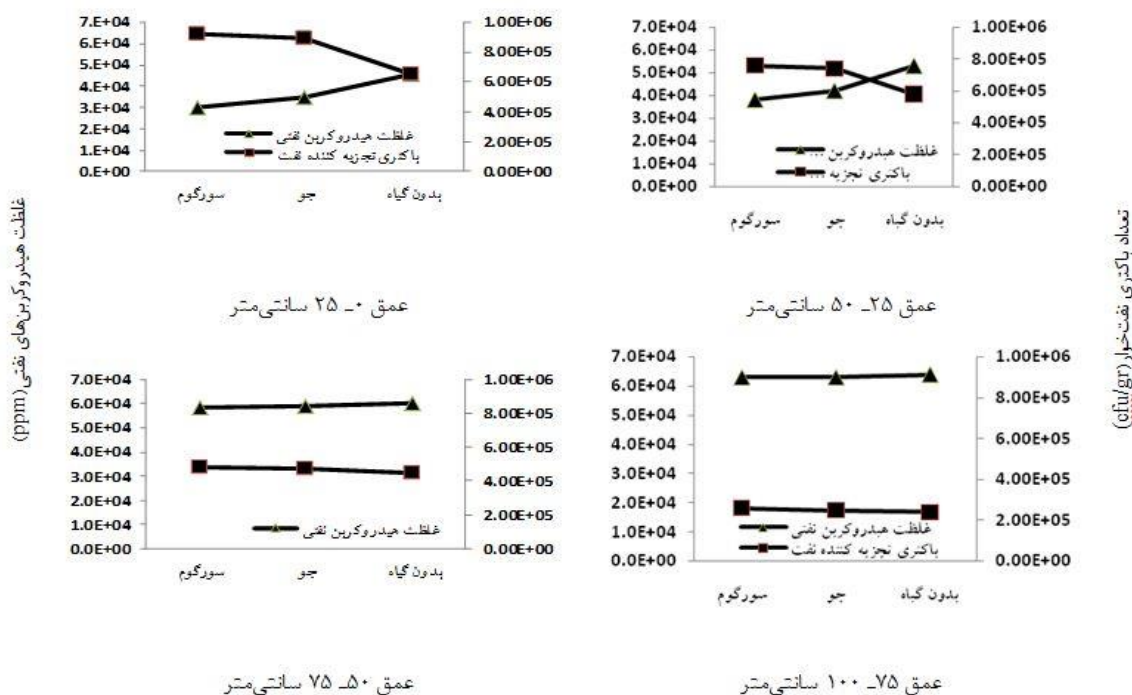
*اعداد هر ستون با حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنادار آماری در سطح ۵ درصد آزمون دانکن ندارند.

در عمق ۰-۲۵ سانتی‌متر کمترین غلظت هیدروکربن نفتی و بیشترین تعداد باکتری نفت‌خوار مربوط به تیمار سورگوم و جو است علت این امر حضور ریشه گیاهی در این عمق است. تفاوت دو تیمار جو و سورگوم از نظر اثر بر غلظت هیدروکربن نفتی و تعداد باکتری‌های نفت‌خوار زیاد نیست ولی تفاوت تیمارهای کشت‌شده با شاهد زیاد است. در عمق ۲۵-۵۰ سانتی‌متر تفاوت بین دو تیمار کشت‌شده و شاهد هنوز وجود دارد زیرا

در این مطالعه علاوه بر اینکه تأثیر حضور و نوع گیاه بر درصد کاهش هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت نشان داده شد. تأثیر عمق نیز بر میزان کاهش هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت در تیمارهای مختلف مشخص شد. شکل ۲ غلظت هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های نفت‌خوار را برای سه تیمار جو، سورگوم و شاهد در چهار عمق به صورت جداگانه نشان می‌دهند.

می‌شود. به همین علت در محدوده عمق ۵۰-۱۰۰ سانتی‌متر شکل نمودارها در هر سه تیمار تقریباً یکسان شده است و در عمق ۷۵-۱۰۰ سانتی‌متری تیمارهای سورگوم، جو و شاهد بیشترین غلظت هیدروکربن‌های نفتی و کمترین تعداد باکتری تجزیه‌کننده نفت مشاهده شد.

ریشه گیاه تا این عمق هنوز نفوذ دارد البته نسبت به عمق ۰-۲۵ سانتی‌متر تعداد باکتری نفت‌خوار کمتر و میزان غلظت هیدروکربن نفتی زیادتر شده است. در اعماق ۵۰-۷۵ و ۷۵-۱۰۰ سانتی‌متر ریشه‌های گیاه سورگوم و جو حضور ندارند بنابراین، شرایط برای هر سه تیمار تقریباً یکسان



شکل ۲. تغییرات غلظت هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری نفت‌خوار در اعماق مختلف خاک

بیشتر بود این موضوع می‌تواند به علت حضور برخی کاتیون‌های فلزی موجود در پسماند نفتی نظیر نیکل و وانادیوم باشد. Marin و همکاران (2005) به بالابودن هدایت الکتریکی در خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی اشاره کردند. بالابودن غلظت املاح و نمک‌ها در خاک‌های آلوده سبب افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌شود.

درصد مواد آلی در خاک آلوده نسبت به شاهد بیشتر بود. افزایش میزان مواد آلی و کربن آلی خاک آلوده در مقایسه با خاک شاهد به علت تجزیه شدن نفت خام در خاک رخ می‌دهد. با افزایش غلظت مواد آلی، ریزجانداران هوازی به سرعت میزان اکسیژن خاک را کاهش می‌دهند و سبب تشکیل محیط‌های بی‌هوازی کوچک در

۴. بحث و نتیجه‌گیری

۴.۱. بحث در مورد نتایج حاصل از اندازه‌گیری

برخی ویژگی‌های خاک

بر اساس مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک آلوده و شاهد منطقه (جدول ۱) مشاهده شد که خاک آلوده به مواد نفتی نسبت به خاک شاهد pH کمتری دارد. دلیل کاهش pH، تولید اسید آلی به علت فعالیت ریزجانداران در خاک (Jingchun *et al.*, 2010) و حضور گوگرد و اکسیدهای گوگرد در پسماندهای نفتی است (Spinelli *et al.*, 2005).

EC خاک آلوده به نفت نسبت به خاک شاهد

هیدروکربن‌های نفتی خاک را بهبود بخشد. در واقع گیاهان قادرند از طریق رهاسازی عناصر غذایی و ترشحات خود در خاک، انتقال اکسیژن به ناحیه ریشه خود، تحریک و افزایش فعالیت جمعیت میکروبی تخریب‌کننده آلاینده‌های نفتی سبب افزایش تخریب این آلاینده‌های آلی در خاک شوند (Smith et al., 2006). در مطالعات مشابه نیز نقش مؤثر گیاهان مختلف در پالایش خاک آلوده به نفت نشان داده شده است. به‌طور مثال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. افزایش ۲۸ درصدی کاهش غلظت پیرن در خاک آلوده با گیاه *Bidens maximowicziana* نسبت به تیمار بدون گیاه (Lu et al., 2010)، افزایش ۳۵ درصدی کاهش ترکیبات نفتی با گیاه *Pharbitis nil L* نسبت به تیمار بدون گیاه (Zhineng et al., 2010). Shahriari و همکاران (2006) نشان دادند در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف نفت خام (۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ درصد) نیز، مقدار کاهش نفت در نمونه‌های دارای گیاه بیش از نمونه‌های بدون گیاه است.

مطالعات بسیاری نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین افزایش تجزیه هیدروکربن‌های نفتی و جمعیت میکروبی در خاک آلوده زیر کشت نسبت به خاک کشت‌نشده وجود دارد. چراکه ریشه‌های گیاهان محیط مناسب‌تری برای فعالیت و توسعه جمعیت میکروبی فراهم می‌کنند و جمعیت میکروبی بزرگ‌تری به‌خصوص در محدوده ریشه آن‌ها به‌وجود می‌آید که منجر به تجزیه و تخریب بیشتر ترکیبات نفتی در این محدوده می‌شود (Moreira et al., 2011; Tang et al., 2012). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری میزان هیدروکربن‌های نفتی و تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت در اعماق مختلف خاک ملاحظه شد که در هر سه تیمار با افزایش عمق تعداد باکتری‌های نفت‌خوار کاهش و غلظت هیدروکربن‌های نفتی افزایش می‌یابد. کاهش تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت در لایه‌های پایین‌تر ستون خاک به‌علت محدود شدن نفوذ ریشه بود به‌طوری‌که بیشترین درصد کاهش نفت در عمق ۰-

داخل خاک می‌شوند که منجر به محدود شدن تجزیه زیستی مواد می‌شود (Randy et al., 2011). درصد نیتروژن کل در خاک آلوده بیشتر از خاک شاهد بود. Ebuehi و همکاران (2005) نیز نشان دادند که افزایش درصد نیتروژن کل خاک با افزایش غلظت هیدروکربن‌های نفتی همراه است.

۲.۴. بحث در مورد نتایج حاصل از عملکرد

ماده خشک گیاه

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده شد کاهش حدود ۲۰ و ۶۵ درصدی در عملکرد ماده خشک ریشه و کاهش حدود ۵۶ و ۷۷ درصدی در عملکرد ماده خشک اندام هوایی به ترتیب برای جو و سورگوم در تیمار آلوده نسبت به تیمار شاهد دیده شد. به نظر می‌رسد که مسمومیت ایجادشده به سبب وجود آلاینده‌های نفتی در خاک و همچنین ایجاد محدودیت در رشد و توسعه ریشه و کاهش قابلیت جذب آب و عناصر غذایی، عوامل اصلی کاهش رشد و عملکرد ماده خشک گیاهی در خاک آلوده بوده است (Chaîneau et al., 1997). Cheema و همکاران نیز در سال ۲۰۰۹ به کاهش ۵۳/۵ و ۲۹/۷ درصدی عملکرد ماده خشک اندام هوایی و ریشه گیاه *Festuca arundinacea* در خاک آلوده به فنانترین و پیرین بعد از ۶۵ روز از رشد فسکیوی بلند اشاره کردند.

۳.۴. بحث در مورد نتایج حاصل از آزمایش

گیاه پالایی

نتایج آنالیزهای آماری مشخص کرد که اختلاف معناداری در سطح ۵ درصد بین تیمار شاهد و دو تیمار دیگر (سورگوم و جو) از نظر کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی خاک وجود دارد به طوری‌که با حضور گیاهان سورگوم و جو درصد کاهش هیدروکربن‌های نفتی خاک ۲۳-۳۵ درصد بیشتر از تیمار بدون گیاه بود و درصد کاهش هیدروکربن‌های نفتی خاک در تیمار سورگوم بیشتر از جو بود. بنابراین، گیاهان سورگوم و جو می‌تواند به شکل مطلوبی فرایند تجزیه بیولوژیکی

افزایش عمق، تعداد باکتری‌های نفت‌خوار کم می‌شود و در نتیجه تجزیه هیدروکربن‌های نفتی نیز کاهش می‌یابد. با توجه به اهمیتی که بررسی و مطالعه روش‌های کاهش میزان غلظت آلاینده‌های نفتی در ستون خاک تا قبل از رسیدن به سفره آب زیرزمینی دارد، پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی برای خاک‌هایی که عمق آلودگی آن‌ها زیاد است، از اقدامات دیگری نظیر زمین‌پالایی، تحریک و تزریق میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده نفت استفاده شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از زحمات مدیر عامل محترم شرکت پالایش نفت اصفهان، مدیر محترم اداره پژوهش و توسعه این شرکت، جناب آقای مهندس ناظم، و سایر پرسنل محترم به‌خصوص جناب آقای مهندس هدایتی کمال تشکر و قدردانی را می‌کنند.

۲۵ سانتی‌متری که بیشترین تراکم ریشه وجود داشت، مشاهده شد. Tang و همکاران نیز در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که در محدوده ریشه جمعیت میکروارگانیسم‌ها چندین برابر بیشتر از خاک بدون حضور ریشه گیاه است. البته با توجه به پژوهش‌های پیشین می‌توان گفت علاوه بر تأثیر افزایش عمق بر کاهش جمعیت میکروبی، افزایش عمق سبب کاهش اکسیژن نیز می‌شود. (Boopathy, 2004) بیان کرد که اولین مرحله متابولیسم هیدروکربن‌های نفتی به‌وسیله باکتری‌ها و قارچ‌های هوازی است. بنابراین، کاهش اکسیژن در لایه‌های پایین‌تر سبب تجزیه آهسته‌تر هیدروکربورهای نفتی و در نتیجه افزایش نفت در عمق می‌شود. در واقع کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی خاک با استفاده از دو گونه گیاهی سورگوم و جو تا عمق نفوذ ریشه بسیار مؤثر بود و برای اعماق بیشتر کاربردی نداشت زیرا با

REFERENCES

- Adam, G., Duncan, H., 2002. Influence of diesel fuel on seed germination. *Journal of Environmental Pollution* 120, 363-370.
- Alaie, A., Vakili, F., Mehrdad Sharif, A., 2011. Phytoremediation of soil contaminated Phenanthrene using Sorghum plant. *Journal of Environmental Studies* 36, 79-88. (in Persian)
- Baghvand, A., Daryabeigi Zand, A., Nabibidhendi, G., Mehrdadi, N., 2011. Use of column leaching test to study the leachability of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soil. *Environmental Sciences* 8, 67-82. (in Persian)
- Black, C.A., 1965. Total exchangeable bases. *Methods of soil analysis, Part 2. Soil science. Soc. of amer, Madison, WI.*
- Boopathy, R., 2004. Anaerobic biodegradation of no 2 diesel fuel in soil: a soil column study. *Bioresource Technology* 94, 143-151.
- Bower, C.A., Reitmeir, R.F., Fireman, M., 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science* 73, 251-261.
- Chaineau, C.H., Morel, J.L., Oudot, J., 1997. Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. *Journal of Environmental Quality* 26, 1478-1483.
- Cheema, S.A., Khan, M.I., Tang, X., Zhang, C., Shen, C., Malik, Z., Ali, S., Yang, J., Shen, K., Chen, X., Chen, Y., 2009. Enhancement of phenanthrene and pyrene degradation in rhizosphere of tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Journal of Hazardous Materials* 166, 1226-1231.
- Christopher, S., Hein, P., Marsden, J., Shurleff, A.S., 1988. Evaluation of methods 3540 (soxhlet) and 3550 (Sonication) for evaluation of appendix IX analyses from solid samples. SCUBED, Report for EPA contract 68-03-33-75, work assignment No.03, Document No. SSS-R-88- 9436.
- Cupers, C., Pancras, T., Grotenhuis, T., Rulkens, W., 2002. The estimation of PAH bioavailability in contaminated sediments using hydroxypropyl-B-cyclodextrin and triton x-100 extraction techniques. *Chemosphere* 46, 1235-1245.
- Diab, E.A. 2008. Phytoremediation of oil contaminated desert soil using the rhizosphere effects. *Global Journal of Environmental Research* 2, 66-73.
- Ebuehi, O.A.T., Abibo, I.B., Shekwolo, P.D., Sigismund, K.I., Adoki, A., Okoro I.C., 2005. Remediation of crude oil contaminated soil by enhanced natural attenuation technique. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 9, 103-106.
- Huang, X.D., El-Alawi, Y., Gurska, J., Glick, B.R., Greenberg, B.M., 2005. A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soils.

- Microchemical Journal 81, 139-147.
14. Jingchun, T., Xiaowei, N., Qing, S., Rugang, W., 2010. Bioremediation of petroleum polluted soil by combination of rygrass with effective microorganisms. Journal of environmental technology and engineering 3, 80-86.
 15. Lu, S., Teng, Y., Wang, J., Sun, Z., 2010. Enhancement of pyrene removed from contaminated soils by *Bidens Maximowicziana*. Chemosphere 81, 645-650.
 16. Marin, J.A., Hernandez, T., Garcia, C., 2005. Bioremediation of oil refinery sludge by land farming in semiarid conditions: influence on soil microbial activity. International journal of environment research and public health 98,185-195.
 17. McCatcheon, S.C., Schnoor, J.L., 2003. Phytoremediation, transformation and control of contaminants, Wiley- Interscience.
 18. Moreira, I.T.A., Oliveira, O.M.C., Triguís, J.A., Santos, A.M.P., Queiroz, A.F.S., Martins, C.M.S., Silva, C.S., Jesus, R.S., 2011. Phytoremediation using *Rizophora mangle L.* in mangrove sediments contaminated by persistent total petroleum hydrocarbons (TPH's). Microchemical Journal 99, 376-382.
 19. Moslehi Moslehabadi, P., Vosoughi, M., Ghadirian, M., 2011. A mathematical model independent of environmental parameters for soil pollution removal by phytoremediation. Journal of Water and Wastewater 22, 85-91. (in Persian)
 20. Olsen, S.R., Sommers, L.E., 1982. Phosphorus. In: Methods of soil analysis, Part 2. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. 403-431.
 21. Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., (Eds.), 1982. Methods of soil analysis. Part2-Chemical and Microbiological methods, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
 22. Randy, H., Kikay, A., Kanga, L., Guzman-Osorio, F.J., Escalante, E., 2011. Comparison of moisture management methods for the bioremediation of hydrocarbon contaminated soil. African journal of biotechnology 10, 394-404.
 23. Rangzan, N., Landi, A., 2008. The role of plants in the refining of petroleum hydrocarbon contaminated soils. Journal of Agriculture 30, 79-91. (in Persian)
 24. Samimi, S.V., Akbari Rad, R., Ghanizadeh, F., 2009. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination level in collected samples from vicinity of a highway. Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering 6, 41-52.
 25. Seyed Alikhani, S., Shorafa, M., Tavassoli, A., Ebrahimi, S., 2011. The effect of plants' growth at different densities on soil petroleum hydrocarbons remediation. Journal of Water and Soil 25, 961-970. (in Persian)
 26. Shahriari, M.H., Savaghebi-Firrozabadi, G., Minai-Tehrani, D., Padidarán, M., 2006. The Effect of Mixed Plants Alfalfa (*Medicagosativa*) and Fescue (*Festuca arundinacea*) on the Phytoremediation of Light Crude Oil in Soil. Environmental Sciences 13, 33-40. (in Persian)
 27. Siddiqui, S., Adams, W. A., 2001. The fate of diesel hydrocarbons in soils and their effect on the germination of Perennial Ryegrass. Environmental Pollution 118, 49-62.
 28. Smith, M.J., Flowers, T.H., Duncan, H.J., Alder, J., 2006. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on germination and subsequent growth of grasses and legumes in freshly contaminated soil and soil with aged PAHs residues. Environmental Pollution 141, 519-525.
 29. Soleimani, M., Afyuni, M., Hajabbasi, M.A., Nourbakhsh, F., Sabzalian, M.R., Christensen, J.H., 2010. Phytoremediation of an aged petroleum contaminated soil using endophyte infected and non-infected grasses. Chemosphere 81, 1084-1090.
 30. Spinelli, L.F., Schnaid, F., Selbach, P.A., Bento, F.M., Oliveira, J.R., 2005. Enhancing bioremediation of diesel oil and gasoline in soil amended with an agroindustry sludge. journal of the air and waste management association 55, 421-429.
 31. Tang, J., Lu, X., Sun, Q., Zhu, W., 2012. Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions. Agriculture, Ecosystems and Environment 149, 109-117.
 32. U.S. EPA., 1984. Interlaboratory comparison stunt: Methods for volatile and semi-volatile compounds, Environmental monitoring systems laboratory, office of research and development, Las Vegas, NV, EPA. 600/4- 84- 027.
 33. Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37, 29-38.
 34. Zhineng, Z., Qixing, Z., Shengwei, P., Zhang, C., 2010. Remediation of petroleum contaminated soils by joint action of *Pharbitis nil L.* and its microbial community. Science of the Total Environment 408, 5600-5605.