تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۴ (ص ۷۵۸-۷۴۹)

بررسی تأثیر کمپوست زبالهٔ شهری و باکتری‌های تجزیه‌کنندهٔ هیدروکربن‌های نفتی بر جذب عناصر غذایی در نهال سپستان (*Cordia myxa* L.) در خاک آلوده به نفت خام

کیوان ولی‌زاده راد [۱]، بابک متشرع‌زاده [۲]*، حسینعلی علیخانی [۳] و مهدی خزایی [۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران

۳. استاد گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران

۴. کارشناس شرکت بهره‌برداری نفت و گاز مارون

(تاریخ دریافت : ۱۳۹۴/۱/۳۰- تاریخ تصویب : ۱۳۹۴/۴/۲۳)

چکیده:

استخراج و پالایش سوخت‌های فسیلی، سبب آلودگی منابع خاک و از دسترس خارج‌شدن قسمت عظیمی از اراضی شده است. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف مادهٔ آلی و باکتری‌های تجزیه‌کنندهٔ هیدروکربن‌ها بر میزان عناصر غذایی نهال سپستان صورت پذیرفت. تیمارها شامل نفت خام (۰، ۳ و ۶ درصد وزنی)، کمپوست زبالهٔ شهری (۰، ۵ و ۱۰ درصد حجمی) و باکتری (بدون باکتری و دارای باکتری *psu141* و *psu27ps*) بود. نتایج نشان داد که بیشترین غلظت عناصر غذایی نیتروژن در شاخساره، فسفر، پتاسیم، منگنز، آهن و روی در شاخساره و ریشه به ترتیب ۳/۶۹، ۰/۲۲، ۰/۱۵، ۱/۸۲، ۱/۵۲ درصد و ۹۴/۹۱، ۱۲۳/۶۶، ۱۱۰/۱۵، ۱۰۶۸/۰۱، ۳۲/۴۴ و ۷۹/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم، در سطح ۱۰ درصد کمپوست و در حضور باکتری بود. بر اساس نتایج این پژوهش، حضور عوامل زیستی سبب افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه سپستان در شرایط تنش آلودگی نفتی شد.

کلیدواژگان: آلودگی خاک، پالایش، عوامل زیستی، محرک رشد.

مقدمه

یکی از عواملی که کیفیت و سلامت خاک را تهدید می‌کند، آلودگی خاک با آلاینده‌های هیدروکربنی است (Rojo, 2009). در کشورهای نفت‌خیز، نفت عامل مهمی در آلودگی محیط زیست محسوب می‌شود. اگرچه نفت خام ماده‌ای اساسی در جوامع صنعتی امروزی است، در طول فرایندهای مختلف استخراج، پالایش، انتقال و استفاده، مکان‌های زیادی در جهان به طور جدی به‌وسیلهٔ هیدروکربن‌ها آلوده شده است (Nam *et al*., 2008). حضور آلودگی‌های هیدروکربنی در محیط زیست نه‌تنها اثر منفی بر سلامت انسان دارد، بلکه از رشد و توسعهٔ گیاه نیز ممانعت می‌کند (Nie *et al*., 2011). علاوه‌بر این، به طور مشخص، بر خصوصیات شیمیایی خاک و نیز جمعیت و فعالیت ریزجانداران خاک‌زی تأثیر دارد (Leme *et al*., 2012). خصوصیات آب‌گریزی هیدروکربن‌های نفتی، توانایی گیاه و ریزجانداران خاک‌زی را برای جذب آب و عناصر غذایی از خاک کاهش می‌دهد (Nie *et al*., 2011). بنابراین، پالایش خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی از مهم‌ترین موضوعات در زمینهٔ علوم و مهندسی محیط زیست است (Khan, 2011; Nie *et al*., 2011; Basumatary *et al*., 2012). در اغلب خاک‌های آلوده، جمعیت ریزجانداران خاک‌زی کاهش می‌یابد، در نتیجه تجزیهٔ هیدروکربن‌ها و رشد و توسعهٔ گیاه کم می‌شود (Huang *et al*., 2004; Zhang *et al*., 2012)؛ لذا استفاده از میکروب‌ها به همراه گیاه به دلیل تأثیر میکروب‌ها در رشد گیاه و تجزیهٔ هیدروکربن‌ها، نتایج مثبتی در خاک‌های آلوده خواهد داشت (Weyens *et al*., 2009; Tang *et al*., 2010; Fernández *et al*., 2011). همچنین، حضور مواد آلی در خاک سبب افزایش فعالیت و جمعیت میکروبی، افزایش قدرت نگهداری و جذب و حرکت آب در خاک، و بهبود وضعیت عناصر غذایی و بهبود وضعیت تهویه در خاک می‌شود که تأثیرات منفی هیدروکربن‌ها بر خاک را کاهش می‌دهد. در این راستا می‌توان قسمت‌های آلی و تجزیه‌پذیر زباله‌ها را که دارای محتوای مناسب میکروبی و عناصر غذایی است، به‌صورت کمپوست استفادهٔ مجدد کرد (Semple *et al*., 2001). برخی محققان نشان دادند که وجود نفت در خاک به طور معناداری فراهمی فسفر و پتاسیم را برای گیاه کاهش می‌دهد و به علت اینکه نیتروژن، پتاسیم، فسفر و اکسیژن برای رشد گیاه ضروری است، کاهش فراهمی آن‌ها

* نویسنده مسئول: moteshare@ut.ac.ir

سبب کاهش رشد گیاه می‌شود (Dimitrow and Markow., 2000). محققان دیگر در بررسی اثر خاک‌های آلوده به گازوییل بر عملکرد و محتوای عنصری لوپن زرد نتیجه گرفتند که افزایش آلودگی، سبب افزایش غلظت فسفر، سدیم، منیزیم و کلسیم در اندام هوایی و ریشه و همچنین تجمع پتاسیم در ریشهٔ این گیاه شد (Wyszkowsk *et al*., 2004).

در پژوهشی، پارامترهای رشدی پنج گونهٔ گیاهی یونجه، کرچک، آفتابگردان، کتان و ذرت در خاک آلوده با استفاده از تیمارهای کودی و توانایی آن‌ها در حذف ترکیبات نفتی از خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که جوانه‌زنی ذرت (بلالی) در خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی، حساسیت کمتری نسبت به سایر گونه‌های بررسی‌شده دارد. آلودگی خاک به هیدروکربن‌های نفتی جوانه‌زنی، طول ریشه، ارتفاع اندام هوایی، زیست‌تودهٔ خشک ریشه و اندام هوایی را به طور چشمگیری در اغلب گیاهان کاهش داد. در عین حال بستر رشد/کود پیت تأثیر مثبتی بر پارامترهای اغلب گیاهان بررسی‌شده داشت. تأثیر کود حیوانی و خاک‌برگ در بیشتر گیاهان چشمگیر نبود. در میان گیاهان رشدکرده در خاک آلوده، بیشترین ارتفاع اندام هوایی در آفتابگردان (۲/۵ سانتی‌متر)، حداکثر طول ریشه در کرچک (۲۶ سانتی‌متر) ، حداکثر زیست‌تودهٔ خشک ریشه در آفتابگردان (۴/۲ گرم)، و حداکثر زیست‌تودهٔ خشک اندام هوایی برای ذرت (۲/۶ گرم) به دست آمد. حداکثر میزان حذف ترکیبات نفتی (۸۷/۶۳ درصد) در کتان انجام گرفت، به طوری که کتان توانست در مدت سه ماه بیش از ۳۵۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم از ترکیبات نفتی خاک را حذف کند (Daryabeygi *et al*., 2006). در آزمایشی اثر یونجه و باکتری‌های غیربومی بر حذف و تغییر شکل پایرن، همچنین بر جمعیت جامعهٔ میکروبی خاک بررسی شد (Jinshao Ye *et al*., 2014). نتایج نشان داد که میزان حذف پایرن در ناحیهٔ ریزوسفری به مراتب بیشتر از ناحیهٔ غیرریزوسفری بود. گیاهان بومی موجود در مناطق آلوده، به علت سازگاری بیشتر با شرایط محیطی و آب‌وهوایی، رشد بهتر و نتایج مؤثرتری را در پالایش آلودگی‌های نفتی موجب می‌شوند.

سپستان با نام علمی *Cordia myxa* L. گیاهی است از خانوادهٔ گاوزبان با نام تیرهٔ *Boragina ceae* که در نقاط مختلف با نام‌های مختلفی شناخته می‌شود و ارتفاع آن به ۸ تا ۱۰ متر می‌رسد (Ghasemi-Dehkordi, 2001). این گیاه برای رشدونمو نیاز اندکی به آب دارد و تابستان‌های خیلی گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد را می‌پسندد و در خاک‌های مناطق گرم می‌روید. اصل این درخت از هندوستان و بومی آسیا و استرالیاست؛ در ایران در سواحل و جزایر جنوبی و جنوب کشور از خوزستان تا سیستان و بلوچستان می‌روید و خواص دارویی فراوانی دارد (Ghasemi-Dehkordi, 2001). این پژوهش با هدف بررسی میزان جذب عناصر غذایی توسط گیاه سپستان به عنوان گیاه بومی مناطق نفت‌خیز در خاک آلوده به نفت خام[1] (TPH) در حضور باکتری‌های بومی تجزیه‌کنندهٔ نفت خام و کمپوست زبالهٔ شهری اجرا شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر عوامل زیستی بر میزان جذب عناصر غذایی در خاک‌های آلوده به نفت خام توسط نهال سپستان موارد زیر به ترتیب صورت گرفت:

۱. نمونه‌برداری خاک. برای اجرای تحقیق در شرایط گلخانه‌ای و به منظور تهیهٔ خاک غیرآلوده، نمونه‌برداری از خاک مزرعهٔ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر) صورت گرفت. پس از آماده‌سازی خاک و عبور از الک ۲ میلی‌متری، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به روش‌های استاندارد و مرسوم آزمایشگاهی تعیین شد (Ali-ehyaei and Behbahanizadeh, 1992) (جدول ۱).

۲. اجرای آزمایش گیاه‌پالایی. بدین منظور آزمایش فاکتوریل در قالب طرحی کاملاً تصادفی با سه تکرار و شامل فاکتورهای زیر انجام شد. فاکتور اول، مادهٔ آلی (کمپوست زبالهٔ شهری) در سه سطح (شاهد، ۵ درصد و ۱۰ درصد حجمی) (Wang *et al*., 2012)؛ فاکتور دوم، تیمار زیستی (باکتری) در سه سطح (شاهد و دوجدایهٔ مقاوم به آلودگی و تجزیه‌کنندهٔ هیدروکربن‌های نفتی) (Najirad *et al*., 2007)؛ فاکتور سوم، سطوح آلودگی خاک به ترکیبات نفتی (شاهد، ۳ درصد و ۶ درصد وزنی نفت خام) (Shahriari *et al*., 2006).

۳. آماده‌سازی تیمارها. خاک هواخشک با بافت لوم رسی و عبوریافته از الک ۴ میلی‌متری، در گلدان‌های پلاستیکی ۵ کیلوگرمی (قطر دهانه ۲۴ سانتی‌متر، قطر کف ۱۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲ سانتی‌متر) توزیع شد. به‌منظور اعمال تیمارهای آلودگی هیدروکربن‌های نفتی، نفت خام از پالایشگاه نفت تهران تهیه شد. سپس، سطوح آلودگی‌های مورد نظر از طریق پاشش، به طور کامل با خاک هر گلدان مخلوط شد، به گونه‌ای که آلودگی تا حد ممکن به طور یکنواخت در خاک پخش شد. تیمارهای کمپوست به طور یکنواخت با خاک‌ها مخلوط شد. گرماگذاری خاک‌ها به مدت سه ماه در دمای ۳۰-۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد صورت گرفت و در طی این مرحلهٔ آبیاری با آب مقطر و به مقدار ۷۰-۸۰ درصد ظرفیت زراعی انجام گرفت.

1. Total Petroleum Hydrocarbons

۴. عملیات کاشت. از بانک ژن گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران دو جدایهٔ برتر از بین جدایه‌های موجود (استخراج‌شده از خاک‌های آلودهٔ پالایشگاه نفت تهران) با بیشترین توان تجزیهٔ ترکیبات نفتی انتخاب شد (Marques-Rocha *et al*., 2001). پس از پایان گرماگذاری سه‌ماهه، به منظور اجرای آزمایش گلخانه‌ای، نهال‌های شش‌ماهه و یکدست سپستان، با متوسط ارتفاع، قطر ساقه و تعداد برگ به ترتیب ۳۵± سانتی‌متر، ۴± میلی‌متر و ده برگ از نهالستان عیسی‌پرهٔ دزفول در استان خوزستان تهیه و به گلخانهٔ گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران منتقل شد. در هر گلدان یک نهال سپستان کاشته شد. برای اعمال تیمار باکتری، ۱۰ میلی‌لیتر از زادمایهٔ باکتری با جمعیت ۱×۱۰^{۸} CFU/ml در اطراف ریشهٔ گیاه مایه‌زنی شد و روی آن‌ها با خاک پوشانده شد (Shahriari *et al*., 2006).

۵. عملیات داشت. در طول شش ماه عملیات داشت، دما و نور گلخانه به صورت روزانه کنترل شد. آبیاری روزانهٔ گلدان‌ها با آب مقطر به صورت وزنی صورت گرفت و رطوبت در حد ۷۰ تا ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه برای گلدان‌ها اعمال شد. با توجه به نتایج اولیهٔ آزمون خاک مقدار ۲/۵ گرم کود کامل محلول در آب آبیاری با فرمول N-P-K (۲۰-۱۰-۲۰) شرکت بین‌المللی یارا در چهار تقسیط به خاک هر گلدان اضافه شد. گیاهان در گلخانه در دمای بیشینهٔ ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد و کمینهٔ ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد و شدت نور ۱۲۰۰۰ لوکس و مدت زمان تاریکی و روشنایی به ترتیب ۱۰ و ۱۴ ساعت به مدت شش ماه نگهداری شد.

۶. هضم تر مواد گیاهی و تهیهٔ عصارهٔ گیاهی. برای تهیهٔ عصارهٔ گیاهی از روش هضم تر استفاده شد. برای این منظور ۱ گرم مادهٔ خشک گیاهی آسیاب شد. نمونه‌های گیاهی درون ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته و ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ اضافه شد و دما به آرامی تا ۴۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد افزایش یافت. پس از سردشدن نمونه‌ها ۵ میلی‌لیتر مخلوط سه اسید (شامل نسبت حجمی ۱۰:۴:۱ از اسید سولفوریک: اسیدپرکلریک: اسید نیتریک) به هر نمونه اضافه و دوباره حرارت داده شد (در این حالت مایع زلالی به دست می‌آید). سپس، ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۶ نرمال به آن اضافه شد. در نهایت، نمونه‌ها به داخل بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری صاف شده و به حجم رسانده شد (Ryan *et al*., 2001).

برای اندازه‌گیری نیتروژن کل شاخساره، ابتدا ۰/۲۵ گرم از نمونهٔ خشک و پودرشده وزن شد و به آن ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالسیلیک و سپس ۱ گرم سولفات پتاسیم اضافه و حرارت داده شد. پس از خنک‌شدن ۲/۵ گرم کاتالیزور (مرکب از سلنیم + پتاسیم + سولفات مس) اضافه و حرارت داده شد تا به رنگ سبز درآید. سپس، در دستگاه کجلدال مقدار نیتروژن کل به‌دست آمد (Ryan *et al*., 2001). برای اندازه‌گیری فسفر شاخساره و ریشه از روش محلول زرد (مولیبدو وانادات) استفاده شد (Ryan *et al*., 2001). فسفر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Schimadzo UV- 3100 و در طول موج ۴۳۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. غلظت پتاسیم شاخساره و ریشه در عصاره‌های گیاهی تهیه‌شده به روش هضم تر و با دستگاه فلیم فتومتر مدل ELEA تعیین شد (Ryan *et al*., 2001). اندازه‌گیری غلظت آهن، روی و منگنز شاخساره و ریشه در عصاره‌های گیاهی تهیه‌شده به روش هضم تر و با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu AA-670 اندازه‌گیری شد (Ryan *et al*., 2001).

نتایج و بحث

به منظور اجرای آزمایش، خاک با بافت متوسط، در محدودهٔ pH خنثی، با شوری کم و فاقد محدودیت عناصر غذایی انتخاب شد. نتایج تجزیهٔ خاک و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده در کشت گلخانه‌ای در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. نتایج برخی ویژگی‌های مهم فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده در این پژوهش

ویژگی خاک	مقدار	ویژگی خاک	مقدار
کلاس بافت	لوم رسی	P (mg/kg)	۱۱/۹۳
pH	۸	K (mg/kg)	۱۳۸/۷۷
ECe (dS/m)	۱/۶۸	Fe* (mg/kg)	۷/۲
کربن آلی (٪)	۰/۵۵	Zn* (mg/kg)	۴/۶۸
نیتروژن کل (٪)	۰/۱	Mn* (mg/kg)	۲۳
رطوبت ظرفیت زراعی (٪)	۲۴	کربنات کلسیم معادل (٪)	۷/۰۱
رطوبت نقطه پژمردگی (٪)	۱۱/۵۸	گچ (٪)	ناچیز

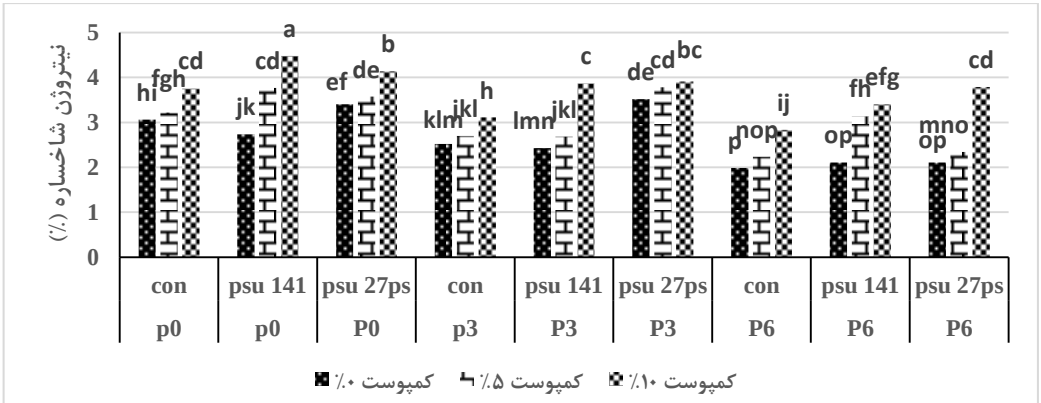
*DTPA Extractable

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که آثار سادهٔ نفت خام، باکتری و کمپوست بر میزان جذب عناصر غذایی نیتروژن، آهن و روی در سطح ۱ درصد ($P<۰/۰۱$) معنادار شد (جدول ۲). آثار متقابل و دوگانهٔ نفت خام در باکتری برای پتاسیم شاخساره، پتاسیم ریشه و فسفر شاخساره در سطح ۱ درصد ($P<۰/۰۱$) معنادار شد، ولی اثر معناداری بر فسفر ریشه و نیتروژن شاخساره مشاهده نشد (جدول ۲). اثر متقابل و دوگانهٔ نفت در کمپوست برای پتاسیم ریشه و نیتروژن شاخساره در سطح احتمال ۱ درصد ($P<۰/۰۱$) و برای فسفر ریشه در سطح احتمال ۵ درصد ($P<۰/۰۵$) معنادار شد، ولی اثر معناداری بر پتاسیم شاخساره و فسفر شاخساره مشاهده نشد (جدول ۲). اثر متقابل و دوگانهٔ باکتری در کمپوست برای فسفر ریشه و

نیتروژن شاخساره در سطح ۱ درصد (P<۰/۰۱) و برای پتاسیم ریشه در سطح ۵ درصد (P<۰/۰۵) معنادار شد، اما اثر معناداری بر پتاسیم شاخساره و فسفر شاخساره مشاهده نشد (جدول ۲). اثر متقابل و سه‌گانهٔ نفت خام در باکتری در کمپوست فقط برای نیتروژن شاخساره و در سطح احتمال ۱ درصد (P<۰/۰۱) معنادار شد، اما اثر معناداری برای سایر عناصر مشاهده نشد (جدول ۲).

نتایج مقایسهٔ میانگین آثار اصلی نفت خام، باکتری و کمپوست با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد بر غلظت عناصر غذایی نشان داد که همواره با افزایش میزان نفت خام، غلظت نیتروژن شاخساره، پتاسیم شاخساره و ریشه کاهش یافت، در حالی که فسفر شاخساره و ریشه افزایش یافت (جدول ۳). همواره با افزایش میزان کمپوست، نیتروژن شاخساره، پتاسیم شاخساره و ریشه، همین‌طور فسفر شاخساره و ریشه افزایش یافت و بیشترین غلظت این عناصر در سطح ۱۰ درصد کمپوست مشاهده شد که دارای اختلاف معناداری نسبت به سایر تیمارها بود (جدول ۳). نتایج حاکی از افزایش میزان نیتروژن شاخساره، پتاسیم شاخساره و ریشه، و نیز فسفر شاخساره و ریشه در حضور باکتری بود که اختلاف معناداری با تیمارهای شاهد (بدون باکتری) در سطح احتمال ۵ درصد داشت (جدول ۳). نتایج مقایسهٔ میانگین آثار متقابل و سه‌گانهٔ نفت خام در باکتری در کمپوست در سطح ۵ درصد نشان داد که همواره در سطوح مشابه آلودگی با افزایش کمپوست میزان نیتروژن شاخساره نیز افزایش یافت و تیمارهای دارای باکتری سودوموناس نیز میزان نیتروژن بیشتری را دارا بود و بیشترین میزان نیتروژن شاخساره در سطح صفر آلودگی (شاهد)، دارای باکتری *psu141* و دارای ۱۰ درصد کمپوست به میزان ۴/۱۴ درصد مشاهده شد که دارای اختلاف معناداری با سایر تیمارها بود (شکل ۱). افزایش میزان نیتروژن شاخساره با افزایش میزان کمپوست ممکن است ناشی از معدنی‌شدن بیشتر نیتروژن باشد. همین‌طور در حضور باکتری‌های افزوده‌شده، احتمالاً به علت افزایش فعالیت آن‌ها و تجزیهٔ بیشتر کمپوست و نفت خام، میزان بیشتری نیتروژن در اختیار گیاه قرار گرفت و محتوای نیتروژن گیاه افزایش یافت. همچنین، به علت توانایی باکتری سودوموناس 27ps در انحلال فسفات‌های نامحلول، میزان فسفر گیاه افزایش و اختلاف معناداری نسبت به شاهد نشان داد. از طرفی، با افزایش میزان کمپوست، به علت بهبود شرایط برای رشد ریزسازواره‌ها و نیز بهبود شرایط فراهمی عناصر غذایی برای گیاه و جذب آن‌ها توسط گیاه، میزان فسفر و پتاسیم گیاه افزایش نشان داد.

نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش میزان نفت خام، غلظت نیتروژن و پتاسیم گیاه کاهش یافت. این نتایج، همسو با یافته‌های دیگر محققان بود که گزارش کردند وجود نفت در خاک به طور معناداری فراهمی فسفر و پتاسیم را برای گیاه کاهش می‌دهد و به علت اینکه اکسیژن و عناصر نیتروژن، پتاسیم و فسفر برای رشد گیاه ضروری است، کاهش فراهمی آن‌ها سبب کاهش رشد گیاه نیز می‌شود (Dimitrow and Markow, 2000). همچنین، محققان دیگر کاهش غلظت سدیم، منیزیم و کلسیم شاخساره، پتاسیم و منیزیم ریشه و افزایش محتوای پتاسیم و نیتروژن شاخساره و سدیم و کلسیم ریشه و نیتروژن را در گیاه جوجوبا تحت شرایط خاک آلوده به نفت گزارش کرده‌اند (Shukry *et al*., 2013). از سوی دیگر، بسیاری از گزارش‌ها بیان کرده‌اند که نفت خام سبب ایجاد شرایط نامساعد برای رشد گیاه در ارتباط با کاهش فراهمی عناصر مورد نیاز در دسترس گیاه می‌شود؛ افزایش سطوح سمی از برخی عناصر مانند آهن و روی گزارش شده است (De Jong, 1980; Udo and Fayemi, 1995).



شکل ۱. نتایج مقایسهٔ میانگین اثر متقابل نفت خام × باکتری × کمپوست بر میزان نیتروژن شاخساره

حروف P0، P3 و P6 به ترتیب، شاهد، آلودگی ۳ درصد و آلودگی ۶ درصد

Con و psu 141 و psu 27ps به ترتیب، تیمار بدون باکتری، دارای باکتری سودوموناس ۱۴۱ و دارای باکتری سودوموناس 27ps

جدول ۲. نتایج تجزیهٔ واریانس اثر تیمارهای مختلف باکتری و کمپوست بر میزان عناصر غذایی گیاه سپستان در تیمارهای مختلف نفت خام

		میانگین مربعات				
منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	پتاسیم شاخساره	پتاسیم ریشه	فسفر شاخساره	فسفر ریشه	نیتروژن شاخساره
نفت خام (P)	۲	۰/۹۷**	۰/۰۹**	۰/۰۰۲۱**	۰/۰۰۴۹**	۵/۶۰**
باکتری (B)	۲	۰/۱۷**	۰/۱۷**	۰/۰۰۲۹**	۰/۰۰۹۵**	۲/۴۷**
کمپوست (C)	۲	۰/۳۶**	۰/۳۵**	۰/۰۱۷۶**	۰/۰۱۱۳**	۷/۵۳**
P*B	۴	۰/۰۵**	۰/۰۵**	۰/۰۰۲۷**	۰/۰۰۰۳^{ns}	۰/۵۳^{ns}
P*C	۴	۰/۰۰۸^{ns}	۰/۰۵**	۰/۰۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۰۸*	۰/۱۳**
B*C	۴	۰/۰۰۷^{ns}	۰/۰۳*	۰/۰۰۰۷^{ns}	۰/۰۰۱۰**	۰/۴۲**
P*B*C	۸	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۰۰۴^{ns}	۰/۰۰۰۳^{ns}	۰/۲۸**
خطا	۵۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۲
ضریب تغییرات(٪)		۷/۲۱	۶/۷۸	۹/۸۷	۱۲/۶۳	۴/۹۹

*، ** به ترتیب بیانگر معناداری تیمارها در سطوح ۵ درصد و ۱ درصد و ns بیانگر عدم وجود اختلاف معنادار بین تیمارهاست.
حروف P، C و B به ترتیب به معنای نفت خام، کمپوست زبالهٔ شهری و باکتری است.

جدول ۳. نتایج مقایسهٔ میانگین تأثیرات مستقل تیمارهای باکتری و کمپوست در سطوح مختلف آلودگی بر غلظت عناصر غذایی سپستان

	پتاسیم شاخساره (٪)	پتاسیم ریشه (٪)	فسفر شاخساره (٪)	فسفر ریشه (٪)	نیتروژن شاخساره (٪)
میزان نفت خام					
شاهد (۰٪)	۱/۹۰^{a}	۱/۵۵^{a}	۰/۱۹^{b}	۰/۱۱^{b}	۳/۵۶^{a}
۳٪ وزنی	۱/۶۷^{b}	۱/۴۳^{b}	۰/۲۰^{a}	۰/۱۳^{a}	۳/۱۷^{b}
۶٪ وزنی	۱/۵۳^{c}	۱/۵۰^{a}	۰/۲۰^{a}	۰/۱۴^{a}	۲/۶۶^{c}
میزان کمپوست					
شاهد (۰٪)	۱/۵۸^{c}	۱/۳۷^{c}	۰/۱۷^{c}	۰/۱۱^{c}	۲/۶۵^{c}
۵٪ حجمی	۱/۷۰^{b}	۱/۵۲^{b}	۰/۲۰^{b}	۰/۱۳^{b}	۳/۰۵^{b}
۱۰٪ حجمی	۱/۸۲^{a}	۱/۵۹^{a}	۰/۲۲^{a}	۰/۱۵^{a}	۳/۶۹^{a}
سطوح باکتری					
شاهد (بدون باکتری)	۱/۶۱^{b}	۱/۴۱^{c}	۰/۱۹^{b}	۰/۱۳^{b}	۲/۸۲^{c}
سودوموناس 141	۱/۷۵^{a}	۱/۵۱^{b}	۰/۲۰^{a}	۰/۱۱^{c}	۳/۱۷^{b}
سودوموناس 27ps	۱/۷۴^{a}	۱/۵۶^{a}	۰/۲۱^{a}	۰/۱۴^{a}	۳/۳۹^{a}

* میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، فاقد اختلاف معنادار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن است.

جدول ۴ نتایج آزمون تجزیهٔ واریانس برای مقدار غلظت عناصر منگنز، آهن و روی در تیمارهای مختلف باکتریایی و کمپوست و در سطوح مختلف نفت خام را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که آثار سادهٔ نفت خام، باکتری و کمپوست بر غلظت عناصر منگنز، آهن و روی در سطح ۱ درصد (P<۰/۰۱) معنادار است، به جز اثر کمپوست بر غلظت روی ریشه که در سطح احتمال ۵ درصد (P<۰/۰۵) معنادار است (جدول ۴). آثار متقابل و دوگانهٔ نفت خام در باکتری برای منگنز شاخساره، منگنز ریشه و آهن شاخساره در سطح ۱ درصد (P<۰/۰۱) و برای روی در ریشه در سطح ۵ درصد (P<۰/۰۵) معنادار است، ولی اثر معناداری بر آهن ریشه و روی شاخساره مشاهده نشد (جدول ۴). اثر متقابل دوگانهٔ نفت در کمپوست برای منگنز شاخساره، منگنز ریشه و روی شاخساره در سطح احتمال ۱ درصد (P<۰/۰۱) معنادار شد، ولی اثر معناداری بر آهن شاخساره، آهن ریشه و روی ریشه مشاهده نشد (جدول ۴). اثر متقابل و دوگانهٔ باکتری در کمپوست فقط برای منگنز شاخساره و منگنز ریشه در سطح ۱ درصد (P<۰/۰۱) معنادار شد، در صورتی که اثر معناداری بر آهن شاخساره، آهن ریشه، روی شاخساره و روی ریشه مشاهده نشد (جدول ۴). اثر متقابل و سه‌گانهٔ نفت خام در باکتری در کمپوست برای منگنز شاخساره، منگنز ریشه و روی ریشه در سطح احتمال ۱ درصد (P<۰/۰۱) معنادار شد و برای سایر عناصر اثر معناداری مشاهده نشد (جدول ۴).

پژوهشگران اثر کشت یونجه و افزودن کود آلی بر حذف بنزو پایرن از خاک‌های آلوده در شرایط استریل (اتوکلاو) را بررسی کردند. بعد از شصت روز فقط ۸/۸ درصد بنزوپایرن از خاک شاهد حذف شد و در خاکی که فقط یونجه کشت شده بود، فقط ۸/۹ درصد از بنزوپایرن حذف شد. همچنین، استفادهٔ هم‌زمان از کود آلی و کشت یونجه باعث حذف ۱۱/۶ درصدی این آلاینده شد و بیشترین پالایش مربوط به افزودن کود آلی به خاک بود. بنابراین، نتیجه گرفتند که کاهش بنزوپایرن در خاک استریل، همچنین افزایش حذف آن در استفاده از کود آلی احتمالاً به این دلیل است که سازوکار اصلی حذف این آلاینده، فعالیت ریزسازواره‌های موجود در خاک است (Fu *et al*., 2012). در پژوهشی، گیاه پالایی پایرن در سه نوع خاک توسط گیاهان یونجه و چاودار با کاربرد مواد آلی بررسی شد. نتایج نشان داد که کاربرد کمپوست تجزیهٔ پیرن را به‌طور معناداری افزایش داد (Wang *et al*., 2012).

جدول ۴. نتایج تجزیهٔ واریانس اثر تیمارهای مختلف باکتری و کمپوست بر مقدار عناصر منگنز، آهن و روی گیاه سپستان در تیمارهای مختلف نفت خام

		میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	منگنز شاخساره	منگنز ریشه	آهن شاخساره	آهن ریشه	روی شاخساره	روی ریشه
نفت خام (P)	۲	۲۱۴۷۲/۷۱**	۴۴۸۸۴/۱۰**	۲۶۷۵/۴۰**	۲۱۵۹۹۲/۷۲**	۴۳۸/۲۱**	۲۲/۳۱**
باکتری (B)	۲	۳۷۳۰/۹۶**	۷۱۰۶/۶۲**	۳۵۵۲/۱۷**	۵۹۶۰۹/۰۸**	۴۳/۳۲**	۳۷/۳۱**
کمپوست (C)	۲	۸۰۴۱/۸۳**	۲۳۱۹۱/۷۴ **	۳۰۳۲/۸۰**	۳۲۵۱۱۷/۱۵**	۱۵۸۸/۲۷**	۸/۲۹*
P*B	۴	۹۰۷/۹۳**	۶۳۵۵/۳۵**	۱۲۷۸/۶۲**	۲۷۴۰/۴۵^{ns}	۵۵/۹۵^{ns}	۵/۹۲*
P*C	۴	۱۶۸۸/۱۸**	۲۸۱۰/۱۲**	۵۸/۱۷^{ns}	۱۶۶۹/۸۳^{ns}	۲۸/۴۹**	۰/۴۳^{ns}
B*C	۴	۴۹۰/۷۸**	۱۵۹۴/۹۱**	۸۳/۰۱^{ns}	۷۴۲۶/۱۸^{ns}	۱۲/۸۷^{ns}	۰/۳۵^{ns}
P*B*C	۸	۴۴۷/۰۲**	۱۱۷۰/۸۹**	۲۸۱/۲۴۴^{ns}	۳۱۹۵/۷۵^{ns}	۲۰/۷۹**	۰/۵۹^{ns}
خطا	۵۴	۵۹/۲۵	۱۳۵/۹۲	۱۳۸/۲۵	۳۲۸۸/۱۵	۵/۶۹	۲/۳۲
ضریب تغییرات(٪)		۹/۹۴	۱۲/۰۶	۱۱/۷۴	۵/۹۱	۹/۲۳	۱/۹۲

*، ** به ترتیب بیانگر معناداری تیمارها در سطوح ۵ درصد و ۱ درصد و ns بیانگر عدم وجود اختلاف معنادار بین تیمارهاست.
حروف P، C و B به ترتیب به معنای نفت خام، کمپوست زبالهٔ شهری و باکتری است.

نتایج مقایسهٔ میانگین آثار اصلی نفت خام، باکتری و کمپوست بر غلظت منگنز شاخساره و ریشه، آهن شاخساره و ریشه، همین‌طور روی شاخساره و ریشه نشان داد که همواره با افزایش میزان نفت خام، غلظت منگنز شاخساره و ریشه و آهن ریشه افزایش یافت، درحالی‌که غلظت آهن شاخساره و روی شاخساره و ریشه کاهش یافت و بیشترین میزان منگنز شاخساره و ریشه و آهن ریشه در سطح سوم نفت خام (۶ درصد) مشاهده شد و دارای اختلاف معناداری با سطح دوم آلودگی (۳ درصد) و بدون آلودگی بود، در صورتی که بیشترین غلظت آهن شاخساره و روی شاخساره و ریشه در تیمار بدون آلودگی مشاهده شد (جدول ۵). با افزایش سطوح کمپوست استفاده‌شده، منگنز شاخساره و ریشه، آهن شاخساره و ریشه، همچنین روی شاخساره و ریشه به طور معناداری افزایش یافت و بیشترین غلظت این عناصر در سطح ۱۰ درصد کمپوست مشاهده شد که دارای اختلاف معناداری در سطح ۵ درصد نسبت به سایر تیمارها بود (جدول ۵). نتایج حاکی از افزایش غلظت منگنز شاخساره و ریشه، آهن شاخساره و ریشه، همین‌طور روی شاخساره و ریشه در حضور باکتری بود که اختلاف معناداری با تیمار بدون باکتری (شاهد) در سطح احتمال ۵ درصد داشت. بیشترین غلظت منگنز شاخساره و ریشه، آهن شاخساره و روی شاخساره و ریشه در حضور باکتری *psu27ps* مشاهده شد (جدول ۵).

نتایج مقایسهٔ میانگین آثار متقابل و سه‌گانهٔ نفت خام در باکتری در کمپوست نشان داد که همواره در سطوح مشابه آلودگی با افزایش کمپوست، میزان منگنز شاخساره و ریشه افزایش می‌یابد و بیشترین مقادیر در بالاترین سطح کمپوست مشاهده شد. در سطح صفر آلودگی (شاهد) اختلاف معناداری بین سطوح مختلف کمپوست، همین‌طور سطوح مختلف باکتریایی مشاهده نشد. در سطح دوم آلودگی با افزایش میزان کمپوست اختلاف معناداری در غلظت منگنز شاخساره مشاهده شد، اگرچه بین تیمارهای مختلف باکتریایی اختلاف معناداری مشاهده نشد. در سطح سوم آلودگی نیز با افزایش میزان کمپوست، غلظت منگنز شاخساره به طور معناداری افزایش پیدا کرد. همین‌طور در تیمارهای دارای باکتری غلظت منگنز بیشتری مشاهده شد، ولی بین تیمار فاقد باکتری (شاهد) و تیمار دارای باکتری *psu141* اختلاف معناداری مشاهده نشد، اما تیمار دارای باکتری *psu27ps* اختلاف معناداری با سایر تیمارها داشت. بیشترین غلظت منگنز شاخساره در سطح سوم آلودگی، دارای ۱۰ درصد کمپوست و باکتری *psu27ps* و به مقدار ۱۷۵/۳ میلی‌گرم مشاهده شد که دارای اختلاف معناداری با سایر تیمارها بود (جدول ۶).

جدول ۵. نتایج مقایسهٔ میانگین تأثیرات مستقل تیمارهای باکتری و کمپوست در سطوح مختلف آلودگی بر غلظت عناصر منگنز، آهن و روی شاخساره و ریشهٔ سپستان

	منگنز شاخساره (mg/kg)	منگنز ریشه (mg/kg)	آهن شاخساره (mg/kg)	آهن ریشه (mg/kg)	روی شاخساره (mg/kg)	روی ریشه (mg/kg)
میزان نفت خام						
شاهد (۰٪)	۵۱/۸۰^{c}	۵۵/۸۷^{c}	۱۱۱/۵۸^{a}	۸۹۱/۷۱^{c}	۳۰/۱۳^{a}	۸۰/۳۲^{a}
۳٪ وزنی	۷۲/۷۵^{b}	۹۶/۶۶^{b}	۹۵/۶۸^{b}	۹۵۱/۰۵^{b}	۲۵/۱۶^{b}	۷۸/۷۶^{b}
۶٪ وزنی	۱۰۷/۶۳^{a}	۱۳۷/۴۱^{a}	۹۳/۲۵^{b}	۱۰۶۷/۵۲^{a}	۲۲/۱۵^{c}	۷۸/۷۲^{b}
میزان کمپوست						
شاهد (۰٪)	۶۰/۴۱^{c}	۶۵/۴۸^{c}	۸۹/۰۴^{c}	۸۵۱/۴۹^{c}	۱۷/۴۱^{c}	۷۸/۶۳^{b}
۵٪ حجمی	۷۶/۸۵^{b}	۱۰۰/۷۹^{b}	۱۱۱/۳۱^{b}	۹۹۰/۷۷^{b}	۲۷/۶۰^{b}	۷۹/۴۹^{ab}
۱۰٪ حجمی	۹۴/۹۱^{a}	۱۲۳/۶۶^{a}	۱۱۰/۱۵^{a}	۱۰۶۸/۰۱^{a}	۳۲/۴۴^{a}	۷۹/۶۷^{a}
سطوح باکتری						
شاهد (بدون باکتری)	۶۵/۰۷^{c}	۸۱/۴۳^{c}	۸۹/۶۳^{c}	۹۱۶/۸۳^{b}	۲۷/۰۸^{a}	۸۰/۰۴^{a}
سودوموناس 141	۷۸/۶۱^{b}	۹۴/۸^{b}	۱۱۲/۳۸^{a}	۹۸۷/۷۷^{a}	۲۴/۵۵^{b}	۷۷/۹۱^{b}
سودوموناس 27ps	۸۸/۴۹^{a}	۱۱۳/۷۱^{a}	۹۸/۴۹^{b}	۱۰۰۵/۶۷^{a}	۲۵/۸۱^{ab}	۷۹/۸۴^{a}

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنادار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن است.

جدول ۶. نتایج مقایسهٔ میانگین تأثیرات متقابل و سه‌گانهٔ نفت خام در باکتری در کمپوست بر غلظت منگنز شاخساره و ریشه و غلظت روی شاخساره

	منگنز شاخساره (mg/kg)	منگنز ریشه (mg/kg)
نفت * باکتری * کمپوست		
$P_0*B_0*C_0$	۴۲/۶۷^{l}	۴۲/۷۰^{mn}
$P_0*B_0*C_5$	۵۱/۴۳^{jkl}	۶۸/۵۷^{ijkl}
$P_0*B_0*C_{10}$	۵۳/۱۳^{jkl}	۵۹/۹۳^{klm}
$P_0*B_1*C_0$	۵۲/۰۳^{jkl}	۴۸/۲۷^{lmn}
$P_0*B_1*C_5$	۵۲/۱۰^{jkl}	۶۴/۰۰^{jklm}
$P_0*B_1*C_{10}$	۵۴/۴۰^{ijkl}	۷۲/۶۶^{ijk}
$P_0*B_2*C_0$	۵۰/۵۰^{jkl}	۴۳/۴۰^{mn}
$P_0*B_2*C_5$	۵۳/۶۳^{ijkl}	۴۶/۸۷^{lmn}
$P_0*B_2*C_{10}$	۵۶/۵۳^{ijkl}	۵۶/۴۳^{klm}
$P_3*B_0*C_0$	۴۶/۳۰^{kl}	۲۸/۷۷^{n}
$P_3*B_0*C_5$	۵۰/۳۷^{jkl}	۱۱۳/۹۷^{g}
$P_3*B_0*C_{10}$	۷۳/۷۶^{gh}	۱۴۲/۳۳^{e}
$P_3*B_1*C_0$	۵۸/۹۰^{ijk}	۵۷/۳۰^{klm}
$P_3*B_1*C_5$	۷۲/۷۶^{h}	۸۱/۸۰^{ij}
$P_3*B_1*C_{10}$	۱۰۶/۱۰^{de}	۹۱/۴۷^{hi}
$P_3*B_2*C_0$	۶۱/۶۳^{hij}	۷۱/۹۰^{ijk}
$P_3*B_2*C_5$	۸۹/۱۰^{f}	۱۱۹/۱۳^{fg}
$P_3*B_2*C_{10}$	۹۵/۸۷^{ef}	۱۶۳/۳۰^{cd}
$P_6*B_0*C_0$	۶۷/۷۷^{hi}	۲۹/۷۰^{n}
$P_6*B_0*C_5$	۸۶/۷۳^{fg}	۱۰۹/۸۷^{gh}
$P_6*B_0*C_{10}$	۱۱۳/۷۳^{cd}	۱۳۷/۰۳^{ef}
$P_6*B_1*C_0$	۹۰/۳۳^{f}	۱۱۱/۹۰^{g}
$P_6*B_1*C_5$	۹۵/۵۰^{ef}	۱۲۱/۴۷^{fg}
$P_6*B_1*C_{10}$	۱۲۵/۴۳^{c}	۲۰۴/۳۳^{a}
$P_6*B_2*C_0$	۷۳/۸۰^{gh}	۱۵۵/۴۷^{jde}
$P_6*B_2*C_5$	۱۴۰/۰۷^{b}	۱۸۱/۵۰^{bc}
$P_6*B_2*C_{10}$	۱۷۵/۳۰^{a}	۱۸۵/۴۷^{ab}

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، فاقد اختلاف معنادار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن است.
حروف P، C و B به ترتیب به معنای نفت خام، کمپوست زبالهٔ شهری و باکتری است.

افزایش محتوای منگنز شاخساره با افزایش میزان نفت ممکن است به علت مقدار زیاد این فلز در نفت خام باشد. همچنین، غلظت زیاد عناصر میکرو در کمپوست استفاده‌شده از دلایل افزایش محتوای آهن، روی و منگنز با افزایش کمپوست استفاده‌شده است. وجود باکتری‌ها نیز با افزایش فعالیت زیستی و تجزیهٔ نفت خام و کمپوست و در پی آن فراهمی بیشتر عناصر موجود در آن‌ها برای گیاه، همین‌طور ایجاد شرایط مناسب برای جذب عناصر غذایی، سبب افزایش محتوای آهن و منگنز شده است. همچنین گیاه به منظور مقابله با شرایط بیش‌بود عناصر در محیط ریشه مقادیر زیادی از برخی عناصر را در ریشه تجمع می‌دهد و مانع جذب بیشتر سایر عناصر سمی می‌شود و غلظت زیاد آهن، روی و منگنز در ریشهٔ گیاه احتمالاً به این دلیل است (Jing *et al*., 2007; Motesharezadeh and Savaghebi, 2015).

محققان در بررسی اثر نفت خام بر عناصر معدنی خاک و گیاه جوجوبا به این نتیجه رسیدند که غلظت فلزات سنگین مس، منگنز، کادمیم و سرب در هر دو بخش گیاه (ریشه و شاخساره) با افزایش سطوح نفت خام افزایش یافت، درحالی‌که روی در مقایسه با شاهد کاهش معناداری نشان داد. نتایج پژوهش حاضر نیز حاکی از افزایش غلظت منگنز و کاهش روی بود. در خاک مس، آهن، منگنز و روی با افزایش سطوح نفت خام افزایش یافت (Shukry *et al*., 2013). تغییرات مشاهده‌شده در غلظت عناصر در گیاه ممکن است به علت آسیب یا تخریب سلول‌ها در فضاها و دیوارهٔ سلولی، تجمع فلزات سنگین یا مواد سمی حاصل از نفت خام باشد. همچنین، نتیجه گرفتند که با افزایش میزان نفت خام، میزان مس، منگنز، کادمیم و سرب به مقدار زیاد، در ریشه تجمع پیدا کرد (بیش از ۲ درصد)، در حالی که میزان روی ریشه و اندام هوایی کاهش یافت و بیشترین انتقال عناصر مس، منگنز، کادمیم و روی در سطح ۳ درصد نفت خام مشاهده شد (Shukry *et al*., 2013). همچنین، بسیاری از گزارش‌ها بیان کرده‌اند که نفت خام سبب ایجاد شرایط نامساعد برای رشد گیاه در ارتباط با کاهش فراهمی عناصر مورد نیاز در دسترس گیاه و افزایش سطوح سمی از برخی عناصر مانند آهن و روی می‌شود (De Jong, 1980; Udo and Fayemi, 1995). بر اساس برخی گزارش‌ها، تعدادی از فاکتورهای خاکی مانند pH، مادهٔ آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و رس بر فراهمی روی در خاک مؤثر است (Alloway, 1995; Nabulo *et al*., 2008).

با توجه به نقش بارز استفاده از کمپوست در بهبود جذب عناصر و افزایش کارایی پالایش، به نظر می‌رسد حضور کمپوست به منزلهٔ کود زیستی بر ایجاد تنوع زیستی و نیز افزایش جمعیت ریزجانداران خاک‌زی مؤثر است. بر این اساس، محققان کاهش بیشتر PAH[1] را در خاک‌های حاوی گیاه نشان دادند و بیان کردند که سازوکارهایی در ریزوسفر اتفاق می‌افتد و ریشهٔ گیاه ترشحاتی خارج می‌کند که سبب تحریک فعالیت جامعهٔ میکروبی[2] مسئول تجزیهٔ PAH می‌شود (Sciliano *et al*., 1998).

در تحقیقات دیگر، نشان داده شد که ترشحات ریشه به طور محسوسی تجزیهٔ زیستی فنانترن را در ریزوسفر خاک افزایش می‌دهد که این کار هم از طریق افزایش زیست‌فراهمی آلودگی و هم از طریق افزایش تعداد و فعالیت جمعیت میکروبی انجام می‌شود (Mollah *et al*., 2001). آلودگی نفتی محتوای برخی عناصر در خاک را بهبود می‌بخشد، مانند منیزیم، پتاسیم، فسفر و سدیم؛ و بر ترکیب شیمیایی دانه‌های ذرت اثر معناداری دارد (Agbogidi, 2007). حساسیت گیاهان به فلزات سنگین، به شبکهٔ مرتبطی از سازوکارهای فیزیولوژیکی بستگی دارد، مانند:

۱. جذب و تجمع فلزات از طریق پیوند با مواد برون‌سلولی مترشحه و مواد خروجی از دیوارهٔ سلولی؛
۲. جریان (حرکت) فلزات سنگین از سیتوپلاسم به واکوئل‌ها؛
۳. کمپلکس‌شدن یون‌های فلزات سنگین در کنار سلول با موادی چون اسیدهای آلی، آمینواسیدها، فیتوکلاتین‌ها و متالوتیونین‌ها؛
۴. تجمع اسمولیت و اسموپروتستانت و القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی؛
۵. تغییر سوخت‌وساز گیاه برای اجازهٔ انجام گرفتن فعالیت‌ها و رسیدن به راه‌های سوخت‌وسازی و تسریع مرمت سلول‌های آسیب‌دیده (Cho *et al*., 2003).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد تیمارهای زیستی باکتریایی و کمپوست سبب بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه شد و با افزایش کمپوست استفاده‌شده، همین‌طور باکتری‌های تجزیه‌کننده و محرک رشد گیاه، جذب عناصر غذایی به‌خوبی صورت گرفت. از آنجا که یکی از آثار منفی آلودگی نفتی، تأثیر

1. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
2. Microbial population

بر جذب عناصر غذایی و برهم‌خوردن وضعیت تغذیه‌ای گیاه و در نهایت کاهش رشد و توانایی گیاه است، با تداوم و تکمیل تحقیقات در این زمینه، می‌توان از این تیمارها در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده بهره برد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از معاونت پژوهشی شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب (NISOC) به دلیل حمایت مالی از این طرح (قرارداد شماره: ۰۸۳۵- ار- ۹۳) تشکر و قدردانی می‌کنند.

REFERENCES

Agbogidi, O. M., Eruotor, P. G., Akparobi, S. O., and Nnaji, G. U. (2007). Evaluation of crude oil contaminated soil on the mineral nutrient elements of maize (Zea mays L.). *Journal of Agronomy*, *6*(1), 188.

Ali-ehyaei, M. and Behbahanizadeh, A. A. (1992). Methods of soil analysis, Bulletin No. 893. 129 pp. (in Persian)

Alloway BJ. (1995). Heavy metals in soils. 2nd. Ed.*Chapmanand Hall*, Glasgow, 34.

Basumatary, B., Bordoloi, S., and Sarma, H.P., (2012). Crude oil-contaminated soil phytoremediation by using *Cyperus brevifolius* (Rottb.) hassk. *Water, Air, Soil Pollution*. (223), 3373–3383.

Cho, M., Chardonnens, A. N., and Dietz, K. J. (2003). Differential heavy metal tolerance of *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis thaliana*: a leaf slice test. *New Phytologist*, *158*(2), 287-293.

Clarkson, D. T., and Hanson, J. B. (1980). The mineral nutrition of higher plants.*Annual review of plant physiology*, *31*(1), 239-298.

Daryabeydi-Zand, A., Nabibidhendi, Gh. R., Mehrdadi, N. and Shirdam, R. (2009). The ability of different plants species on oil hydrocarbon refined from soil and effect of oil contamination on plant growth, *Environmental Science and Technology*, 12(4): 41-57.

De Jong, E. (1980). The effect of a crude oil spill on cereals. *Environmental Pollution series A, Ecological and biological*, *22*(3), 187-196.

Dimitrow, D. N., and Markow, E. (2000). Behaviour of available forms of NPK in soils polluted by oil products. Poczwoznanie. *Agrochimija I Ekologia*, *35*(3), 3-8.

Fernández M.D, Pro J, Alonso C, Aragonese P, and Tarazona J.V. 2011. Terrestrial microcosms in a feasibility study on the remediation of diesel-contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74: 2133–2140.

Fu, D., Teng, Y., Luo, Y., Tu, C., Li, S., Li, Z., and Christie, P. (2012). Effects of alfalfa and organic fertilizer on benzo [a] pyrene dissipation in an aged contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(5), 1605-1611.

Ghasemi-Dehkordi, N. 2001. Iranian Herbal Pharmacopoeia, Ministry of Health and Medical Education Press, 795 p. (in Persian)

Huang, X. D., El-Alawi, Y., Penrose, D. M., Glick, B. R., and Greenberg, B. M. (2004). Responses of three grass species to creosote during phytoremediation. *Environmental Pollution*, 130(3), 453-463.

Jing YD, He ZL, Yang XE. (2007). Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. J Zhejiang Univ Sci B. 8(3): 192-207.

Khan S, Afzal M, Igbal S, M. Kh Q. (2012). Plant–bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. *Chemosphere* 90: 1317–1332.

Leme D. M, Grummt T, de Oliveira D. P, Sehr A, Renz S, Reinel S and Marin-Morales M. A. (2012). Genotoxicity assessment of water soluble fractions of biodiesel and its diesel blends using the Salmonella assay and the in vitro MicroFlow® kit (Litron) assay. *Chemosphere* 86(5): 512-520.

Leme, D. M., Grummt, T., Heinze, R., Sehr, A., Renz, S., Reinel, S., and Marin-Morales, M. A. (2012). An overview of biodiesel soil pollution: Data based on cytotoxicity and genotoxicity assessments. *Journal of hazardous materials*,*199*, 343-349.

Marquez-Rocha, F. J., Hernández-Rodrí, V., and Lamela, M. T. (2001). Biodegradation of diesel oil in soil by a microbial consortium. *Water, Air, and Soil Pollution*, *128*(3-4), 313-320.

Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., and Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) science and applications. *Journal of hazardous materials*, *84*(1), 29-41.

Motesharezadeh, B. and Savaghebi, GH. R. (2015). Phytoremediation or green remediation, University of Tehran Press, 246 p. (in Persian)

Nabulo, G., Oryem Origa, H., Nasinyama, G. W., and Cole, D. (2008). Assessment of Zn, Cu, Pb and Ni contamination in wetland soils and plants in the Lake Victoria basin. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *5*, 65-74.

Naji-Rad S, Alikhani H.A, Hasaninejad-Farahani M.R, Ghavidel A and Savaghebi Gh. R. (2007). Study of the efficiency of gasoline biologic remediation in Soil by two native bacteria in soil contaminated of Tehran refinery. *2th National Conferences of Iranian Agroecology*. (in Persian)

Nam, J. J., Thomas, G. O., Jaward, F. M., Steinnes, E., Gustafsson, O., and Jones, K. C. (2008). PAHs in background soils from Western Europe: influence of atmospheric deposition and soil organic matter. *Chemosphere*, *70*(9), 1596-1602.

Nie, M., Wang, Y., Yu, J., Xiao, M., Jiang, L., Yang, J., Fang, C., Chen, J., Li, B. (2011). Understanding plant–microbe interactions for phytoremediation of petroleum polluted soil. PLoS ONE 6, e17961.

Odjegba, V. J., and Atebe, J. O. (2007). The effect of used engine oil on carbohydrate, mineral content and nitrate reductase activity of leafy vegetable (*Amaranthus hybridus* L.). *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, *11*(2): 191-196.

OnweremaduEU, Duruigbo CI. (2007). Assessment of cadmium concentration of crude oil polluted arable soil. *International Journal of Environmental Science*. Tech, 4, 409-412.

Rojo, F., (2009). Degradation of alkanes by bacteria: minireview. *Environtal Microbiology*. 11: 2477–2490.

Ryan, J., Estefan, G., and Rashid, A. (2007). *Soil and plant analysis laboratory manual*. ICARDA.

Siciliano, S. D., and Germida, J. J. (1998). Mechanisms of phytoremediation: biochemical and ecological interactions between plants and bacteria. *Environmental reviews*, *6*(1), 65-79.

Semple K T, Reid BJ, Fermor TR. (2001). Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. *Environmental Pollution* 112:269 –83.

Shahriari M. H, Savaghebi Gh. R, Minaei-Tehrani D, and Padidaran M. (2006). Effect of alfalfa and festuca Cultivation in Phytoremediation of Soil Contaminated by oil. *Environmental journal* 3(13): 168-179. (in Persian)

Shukry, W. M., Al-Hawas, G. H. S., Al-Moaikal, R. M. S., and El-Bendary, M. A. (2013). Effect of petroleum crude oil on mineral nutrient elements, soil properties and bacterial biomass of the rhizosphere of jojoba. *Brtish Journal of Environment and Climate Change*, *3*, 103-118.

Tang J, Wang R, Niu X, Wang M, Zhou Q. (2010). Characterization on the rhizoremediation of petroleum contaminated soil as affected by different influencing factors. *Biogeosciences*. Discuss 7: 4665–4688.

Udo, E. J., and Fayemi, A. (1975). The effect of oil pollution of soil on germination, growth and nutrient uptake of corn. *Journal of Environmental Quality*. 4(4), 537-540.

Wang, M. C., Chen, Y. T., Chen, S. H., Chang Chien, S. W., and Sunkara, S. V. (2012). Phytoremediation of pyrene contaminated soils amended with compost and planted with ryegrass and alfalfa. *Chemosphere*, *87*(3), 217-225.

Weyens N, van der Lelie D, Taghavi S, Newman L, Vangronsveld J .(2009). Exploiting plant–microbe partnerships to improve biomass production and remediation. *Trends in Biotechnology* 27: 591–598.

Wyszkowsk, M, Wyszkowska, J, and Ziółkowska, A. (2004). Effect of soil contamination with diesel oil on yellow lupine yield and macroelements content. *Plant, Soil and Environment*. 50, (5): 218–226.

Ye, J., Yin, H., Peng, H., Bai, J., and Li, Y. (2014). Pyrene removal and transformation by joint application of alfalfa and exogenous microorganisms and their influence on soil microbial community. *Ecotoxicology and environmental safety*, *110*, 129-135.

Zhang, Z., Rengel, Z., Chang, H., Meney, K., Pantelic, L., Tomanovic, R. (2012). Phytoremediation potential of Juncus subsecundus in soils contaminated with cadmium and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs). *Geoderma* 175–176, 1–8.