

Investigation of the possibility of using the wastewater in phytoremediation of diesel contaminated soil

Omid Bahmani^{*1}, Shiva Mottaghi², Vahid Atlasi Pak³

1. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: omid.bahmani@basu.ac.ir
2. Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Dept. of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: shiva.mottaghi1368@gmail.com
3. Assistant Prof., Dept. of Agriculture, Payam Noor University, Tehran, Iran. E-mail: v.atlassi@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 06.10.2022
Revised: 09.07.2022
Accepted: 08.29.2022

Keywords:
Diesel,
Phytoremediation,
Soil contamination,
Wastewater

ABSTRACT

Background and Objectives: Phytoremediation is one of the most efficient and cost-effective biological methods for removing contaminants, including petroleum products, from the soil. Understanding the mechanisms of phytoremediation and examining the parameters involved in the phytoremediation process leads to better management and increase the efficiency of this method. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of factors such as diesel concentration, type of irrigation water and type of plant on phytoremediation of diesel-contaminated soil, using Grass pea (*Lathyrus sativus* L.) and Tall fescue (*Festuca arundinacea*).

Materials and Methods: A two-year pot experiment was conducted in greenhouse conditions to evaluate the phytoremediation during 2018 and 2019. The experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications. The treatments of this experiment were diesel contaminated soil at two levels of 1.5 and 3% and irrigation water at two levels of freshwater and wastewater (treated municipal wastewater). Drainage water, soil and plants were sampled three months after planting and the amount of diesel in the samples was measured using the gravimetric method. Based on the initial concentration of diesel in the soil, the participation of different factors in diesel removal was determined and compared with each other.

Results: The results showed that the Tall fescue plant reduced the amount of diesel in the soil by a maximum of 62.4% and a minimum of 47.9% and the amount of removal diesel in phytoremediation by Grass pea was achieved with a maximum of 63.0% and a minimum of 44.2%. Among the diesel removal mechanisms, Phytoextraction mechanism had the lowest participation (2-12%) and Phytodegradation-Rhizodegradation mechanisms had the highest participation (71-84%). The amount of diesel in drainage water was 11-21%. All of D3% treatments were significantly different with D1.5% treatments only in the amount of diesel in drainage water in Tall fescue-2018 experiment and the amount of Phytoextraction in Tall fescue-2019 experiment. In other experiments, no significant difference was observed between the two levels of diesel. Evaluation of the effect of irrigation water quality on diesel removal mechanisms showed that the amount of diesel in drainage in the D1.5%-wastewater-Tall fescue-2019 treatment was significantly less than other treatments. Phytoextraction had

the highest value in the D1.5%-freshwater-Grass pea-2019 treatment and the lowest value in the D3%-wastewater-Grass pea-2019 treatment, no significant difference was observed between the two types of irrigation water in other experiments. In the Phytodegradation-Rhizodegradation mechanisms, only D1.5%-freshwater-Tall fescue-2018 treatment was significantly different from other treatments.

Conclusion: The results showed that changes in factors such as plant species, diesel concentration and type of irrigation water can have a significant effect on diesel removal, but the degree of effectiveness of each factor is different depending on the diesel concentration, the treatment degree of irrigation water, and the resistance of plants and soil microorganisms against diesel toxicity.

Cite this article: Bahmani, Omid, Mottaghi, Shiva, Atlasi Pak, Vahid. 2022. Investigation of the possibility of using the wastewater in phytoremediation of diesel contaminated soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29 (3), 1-21.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2022.20307.3563

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی امکان استفاده از پساب در گیاه‌پالایی خاک آلوده به گازوئیل

امید بهمنی*^۱، شیوا متقی^۲، وحید اطلسی پاک^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، همدان، ایران. رایانامه: omid.bahmani@basu.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، همدان، ایران. رایانامه: shiva.mottaghi1368@gmail.com
۳. استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران. رایانامه: v.atlassi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: گیاه‌پالایی یکی از روش‌های بیولوژیکی کارآمد و کم‌هزینه برای پاکسازی آلاینده‌ها، از جمله مواد نفتی از خاک می‌باشد. شناخت مکانیزم‌های گیاه‌پالایی و بررسی پارامترهای دخیل در فرآیند گیاه‌پالایی منجر به مدیریت بهتر و افزایش کارآمدی این روش می‌گردد. هدف از این پژوهش، بررسی اثر عواملی مانند غلظت آلاینده، کیفیت آب آبیاری و نوع گیاه بر گیاه‌پالایی خاک آلوده به گازوئیل با استفاده از گیاه خلر (<i>Lathyrus sativus</i> L.) و گیاه فستوکای بلند (<i>Festuca arundinacea</i>) می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۰۱/۰۳/۲۰ تاریخ ویرایش: ۰۱/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۶/۰۷	مواد و روش‌ها: یک آزمایش گلدانی دو ساله به منظور ارزیابی گیاه‌پالایی در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه انجام شد. تیمارهای این آزمایش، عبارت‌اند از: خاک آلوده به گازوئیل در دو سطح ۱/۵ و ۳ درصد و آب آبیاری در دو سطح آب شیرین و پساب (فاضلاب شهری تصفیه‌شده). سه ماه پس از کاشت، از زهاب خروجی، خاک و گیاهان نمونه‌برداری انجام شد و میزان گازوئیل موجود در نمونه‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری شد. بر اساس غلظت اولیه گازوئیل در خاک، مشارکت عوامل مختلف در حذف گازوئیل تعیین و با یکدیگر مقایسه شد.
واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، پساب، گازوئیل، گیاه‌پالایی	یافته‌ها: نتایج نشان داد که گیاه فستوکای بلند گازوئیل موجود در خاک را به میزان حداکثر ۶۲/۴ و حداقل ۴۷/۹ درصد کاهش داد و مقدار کاهش گازوئیل در گیاه‌پالایی توسط گیاه خلر حداکثر ۶۳/۰ و حداقل ۴۴/۲ درصد به دست آمد. از میان مکانیزم‌های حذف گازوئیل کم‌ترین نقش را استخراج گیاهی با مقدار حداقل ۲ درصد و حداکثر ۱۲ درصد و بیش‌ترین نقش را مکانیزم‌های تخریب گیاهی-ریزوسفری با مقدار حداقل ۷۱ درصد و حداکثر ۸۴ درصد بر عهده

داشتند. کم‌ترین مقدار گازوئیل خارج شده از خاک توسط زهاب ۱۱ درصد و بیش‌ترین مقدار آن ۲۱ درصد به‌دست آمد. تیمارهای دارای غلظت گازوئیل ۳ درصدی، تنها در میزان خروج گازوئیل از طریق زهاب در آزمایش اول گیاه فستوکای بلند و میزان استخراج گیاهی در آزمایش دوم همان گیاه با تیمارهای دارای غلظت گازوئیل ۱/۵ درصد تفاوت معنی‌دار داشتند، در سایر آزمایش‌ها تفاوت معنی‌داری بین دو سطح گازوئیل مشاهده نشد. ارزیابی اثر کیفیت آب آبیاری بر مکانیزم‌های حذف گازوئیل نشان داد که خروج گازوئیل از طریق زهاب در تیمار گازوئیل ۱/۵ درصد-پساب در آزمایش دوم گیاه فستوکای بلند به‌طور معنی‌داری کم‌تر از سایر تیمارها بود، استخراج گیاهی در آزمایش دوم گیاه خلر در تیمار گازوئیل ۱/۵ درصد-آب شیرین بیش‌ترین مقدار و در تیمار گازوئیل ۳ درصد-پساب کم‌ترین مقدار را داشت. در سایر آزمایش‌ها تفاوت معنی‌داری بین دو کیفیت آب آبیاری مشاهده نشد. در مورد مکانیزم تخریب گیاهی و ریزوسفری، فقط تیمار گازوئیل ۱/۵ درصد-آب شیرین-آزمایش اول گیاه فستوکای بلند با سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که تغییر فاکتورهایی مانند گونه گیاهی، غلظت گازوئیل و کیفیت آب آبیاری می‌تواند در حذف گازوئیل اثر معنی‌دار داشته باشد، اما درجه اثرگذاری هر یک از عوامل بسته به میزان گازوئیل، درجه تصفیه آب آبیاری و مقاومت گیاه و میکروارگانیسم‌های خاک در برابر سمیت گازوئیل، متفاوت است.

استناد: بهمنی، امید، متقی، شیوا، اطلسی پاک، وحید (۱۴۰۱). بررسی امکان استفاده از پساب در گیاه‌پالایی خاک‌آلوده به گازوئیل.

پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۹ (۳)، ۲۱-۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2022.20307.3563



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

آلودگی محیط زیست توسط ترکیبات نفتی به دلیل افزایش اکتشاف، تولید و مصرف نفت در سراسر جهان افزایش یافته است (۱). گازوئیل یکی از مهم‌ترین منابع انرژی در ایران و سایر کشورهای دنیا می‌باشد که استفاده گسترده از آن و شیوه نامناسب دفع زباله، ریختن تصادفی و نشت از مخازن، انبارها و مکان‌های دفن زباله منجر به آلودگی آب و خاک گردیده است (۲). روش‌های فیزیکی و شیمیایی پاکسازی مکان‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی شامل حفاری و تخلیه، شستشوی خاک، دفع حرارتی و اکسیداسیون شیمیایی می‌باشد که این فناوری‌ها پرهزینه بوده و می‌توانند منجر به تخریب ناقص هیدروکربن و آلودگی مجدد محیط زیست شوند (۳ و ۴). این در حالی است که روش‌های بیولوژیکی، از جمله گیاه‌پالایی، به دلیل سازگاری با محیط زیست و مقرون به صرفه بودن، بدون نیاز به حفاری و جابجایی، راه‌حل مناسب‌تری برای پاکسازی ارائه می‌دهد (۵ و ۶). منظور از گیاه‌پالایی، استفاده از گیاهان و میکروارگانیسم‌های ریزوسفری برای تجزیه بیولوژیکی آلاینده‌ها در آب، رسوبات، خاک و هوا می‌باشد. از آنجایی که گیاه‌پالایی فرآیندی است زمان‌بر، برای افزایش کارایی آن باید گیاهانی را انتخاب کرد که به سرعت رشد کنند، حجم ریشه قابل‌توجهی داشته باشند، سازگار با شرایط سخت محیطی بوده و به کوددهی و مراقبت کم‌تری نیاز داشته باشند. میزان اثربخشی فرایند گیاه‌پالایی، به ویژگی‌های آلاینده، گونه گیاهی و شرایط محیطی مانند عناصر غذایی موجود در خاک، نوع و تعداد ریز جانداران موجود در ریزوسفر بستگی دارد (۷ و ۸). گیاهان مختلفی از جمله گندمیان، بقولات، گیاهان زراعی، گیاهان زینتی و درختان برای حذف هیدروکربن‌ها از طریق گیاه‌پالایی استفاده شده‌اند (۹).

نتایج بررسی‌ها نشان داده است که گیاهان خانواده گندمیان و بقولات در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فرآورده‌های نفتی مؤثرتر هستند (۱۰ و ۱۱). رشد سریع، نفوذ عمیق و سیستم فیبری متراکم و گسترده ریشه چمن از مزیت‌های اصلی آن نسبت به سایر گیاهان است. فستوکای بلند یکی از گیاهان خانواده گندمیان می‌باشد که در بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه گیاه‌پالایی هیدروکربن‌ها موفق عمل کرده است (۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵). از طرف دیگر حبوبات به دلیل توانایی در نگهداری باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و غنی‌سازی خاک با نیتروژن می‌توانند در خاک‌های آلوده به نفت که نسبت کربن به نیتروژن بالایی دارند، به خوبی رشد کنند و انتخاب مناسبی برای گیاه‌پالایی باشند (۱۶).

گونه‌های گیاهی می‌توانند از طریق روش‌های مختلفی پاکسازی مکان‌های آلوده را تسهیل کنند، مانند: تبخیر گیاهی: آزادسازی آلاینده توسط گیاه به شکل بخار، تخریب گیاهی: تجزیه آلاینده توسط آنزیم‌های گیاهی که معمولاً در داخل بافت گیاه انجام می‌شود، استخراج گیاهی: پاکسازی آلاینده از طریق جذب توسط گیاه و تجمع در بافت‌های آن و تخریب ریزوسفری: تخریب آلاینده‌ها در ناحیه ریشه یا ریزوسفر (۱۷). برای مدیریت بهتر گیاه‌پالایی ضروریست که میزان اثربخشی مکانیزم‌های مختلف گیاه‌پالایی تحت شرایط مختلف بررسی شود. یکی از مسائل موجود در خصوص کشت گیاهان با هدف گیاه‌پالایی، آبیاری آن است. در شرایط کنونی بحران آب، استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده می‌تواند راه‌حل مناسبی باشد (۱۸). در این پژوهش با استفاده از دو گیاه فستوکای بلند (از خانواده گندمیان) و خلر (از خانواده بقولات) در شرایط آبیاری با آب شیرین و فاضلاب شهری تصفیه‌شده، مکانیزم‌های مختلف گیاه‌پالایی خاک‌آلوده به گازوئیل بررسی و مقایسه

شدند، با این هدف که مقدار مشارکت هریک از مکانیزم‌های گیاه پالایی تحت تأثیر دو نوع آب آبیاری و دو سطح آلودگی تعیین گردد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه دانشگاه بوعلی سینا همدان با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۸۱۰ متری از سطح دریا اجرا شد. آزمایش در پاییز سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ انجام شد. خاک مورد استفاده از مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی

دانشگاه بوعلی سینا جمع‌آوری گردید، نتایج اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. بافت خاک به روش هیدرومتری، کربن آلی به روش والکلی بلاک، هدایت الکتریکی گل اشباع با استفاده از دستگاه EC متر و اسیدیته با استفاده از pH متر، میزان نیتروژن خاک با روش کج‌دال، فسفر قابل جذب با روش اولسن و پتاسیم قابل جذب با روش فلیم فتومتر اندازه‌گیری شدند (۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳).

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در مطالعه.

Table 1. Some physical and chemical characteristics of the soil used in study.

سال	بافت خاک	کربن آلی	اسیدیته	هدایت الکتریکی	نیتروژن	پتاسیم	فسفر
Year	Soil Texture	Organic Carbon %	pH	(میکروزیمنس بر متر)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم)
				EC	N	K	P
				(dS/m)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
۱۳۹۷	لوم شنی	0.97	6.94	0.25	0.1	189	13.6
۱۳۹۸	لوم رسی شنی	0.62	7.38	0.71	0.05	207.2	11.2

برای اعمال تیمارهای آلودگی، خاک مربوط به هر گلدان به وسیله اسپری به طول کامل و یکنواخت به گازوئیل آغشته گردید. پس از آماده‌سازی خاک‌ها، گلدان‌هایی با جنس پلی‌اتیلن به قطر ۲۵ و ارتفاع ۲۷ سانتی‌متر تهیه شد و به منظور جمع‌آوری زهاب خروجی گلدان، در پایین‌ترین نقطه جداره هر گلدان حفره‌ای ایجاد شد و از طریق شیلنگ به یک بطری وصل شد تا کل زهاب خروجی در آن ذخیره گردد. برای زهکشی بهتر خاک، کف گلدان‌ها با سنگریزه پوشیده شد، سپس گلدان‌ها با خاک‌های آلوده به گازوئیل پر شدند و قبل از شروع آزمایش و کاشت گیاه به مدت سه ماه در گلخانه نگه داشته شدند تا

برهمکنش لازم بین خاک و گازوئیل صورت پذیرد. بذر گیاهان خلر و فستوکای بلند در عمق ۱/۵ الی ۲ سانتی‌متری سطح خاک کاشته شدند. متوسط دمای گلخانه ۳۲/۱۴ درجه سانتی‌گراد (حداقل ۲۲/۳ و حداکثر ۴۶/۲ درجه سانتی‌گراد) و متوسط رطوبت نسبی هوا ۴۹/۶ درصد (حداقل ۲۹ و حداکثر ۶۷/۳ ± ۵۹) بود و از نور طبیعی برای روشنایی گلخانه استفاده شد. پس از گذشت تقریباً ۱۰ روز که گیاهان به مرحله جوانه‌زنی رسیدند، بوته‌های قوی‌تر به تعداد موردنیاز انتخاب و سایر بوته‌های ضعیف از گلدان حذف شدند. در طول دوره رشد، گیاهان با استفاده از آب شیرین و پساب آبیاری شدند. منبع آب شیرین،

بررسی امکان استفاده از پساب در گیاه‌پالایی خاک آلوده به گازوئیل / امید بهمنی و همکاران

چاه گلخانه و منبع پساب نیز خروجی تصفیه‌خانه
مورد استفاده برای آبیاری در جدول ۲ ارائه گردیده
فاضلاب شهری همدان بود. خصوصیات شیمیایی آب
است.

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب شیرین و پساب مورد استفاده در آزمایش.

Table 2. Chemical characteristics of the freshwater and wastewater used in the study.

مقدار استاندارد فائو (۲۴) FAO standard (24)	مقدار متوسط در آب شیرین Freshwater Value	مقدار متوسط در پساب تصفیه‌شده Treated Wastewater Value	پارامتر Parameters	
0.7	0.63	0.94	EC (dS/m)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)
3	0.56	2.6	SAR	نسبت جذب سدیم
6-8.5	7.4	7.9	pH	اسیدیته
400	56.1	92.2	Ca ²⁺ (mg/l)	کلسیم (میلی‌گرم بر لیتر)
60	13.4	40.1	Mg ²⁺ (mg/l)	منیزیم (میلی‌گرم بر لیتر)
900	17.9	119.5	Na ⁺ (mg/l)	سدیم (میلی‌گرم بر لیتر)
2	12.3	25.2	K ⁺ (mg/l)	پتاسیم (میلی‌گرم بر لیتر)
2	8.3	12.6	P (mg/l)	فسفر (میلی‌گرم بر لیتر)
960	18.3	36.0	SO ₄ ²⁺ (mg/l)	سولفات (میلی‌گرم بر لیتر)
600	213.6	549.2	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	بی‌کربنات (میلی‌گرم بر لیتر)
-	2.9	12.6	COD (mg/l)	اکسیژن‌خواهی شیمیایی (میلی‌گرم بر لیتر)
100	0.7	4.6	BOD (mg/l)	اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (میلی‌گرم بر لیتر)
5	1.8	7.6	NO ₃ -N (mg/l)	نترات (میلی‌گرم بر لیتر)
0.2	-	0.05	Ni (mg/l)	نیکل (میلی‌گرم بر لیتر)
5	-	0.04	Pb (mg/l)	سرب (میلی‌گرم بر لیتر)
0.01	-	0.02	Cd (mg/l)	کادمیم (میلی‌گرم بر لیتر)
2	-	0.12	Zn (mg/l)	روی (میلی‌گرم بر لیتر)

PWP رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم
(درصد)، MAD حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی. مقدار
این پارامتر و D عمق ریشه (سانتی‌متر) می‌باشد. با
توجه به بافت خاک، رطوبت ظرفیت زراعی و
پژمردگی دائم به‌دست آمد. حداکثر تخلیه مجاز
رطوبتی با توجه به نوع گیاه و بر اساس نشریه فائو

عمق آب مورد نیاز جهت آبیاری گیاهان با استفاده
از رابطه ۱ تعیین گردید (۲۵).

$$In = (Fc - PWP) \times MAD \times D \quad (1)$$

که در آن، In عمق آب آبیاری (سانتی‌متر)، Fc
رطوبت حجمی خاک در نقطه ظرفیت زراعی مزرعه،

به مدت ۷۲ ساعت در فضای آزاد قرار داده شد تا حلال به طور کامل تبخیر شود. در نهایت از تفاضل وزن ظرف حاوی گازوئیل و وزن اولیه ظرف خالی، میزان گازوئیل موجود در نمونه خاک به روش وزنی اندازه‌گیری شد. استخراج و اندازه‌گیری گازوئیل در گیاه به همان روش استخراج از خاک انجام شد (۲۶).

به منظور استخراج گازوئیل از زهاب، ۱۰۰ میلی‌لیتر از نمونه، داخل قیف دکانتور ریخته شد، سپس ۳۰ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان به عنوان حلال به قیف اضافه گردید و قیف به مدت دو دقیقه به خوبی تکان داده شد. پس از این که قیف در حالت سکون قرار داده شد و دو مایع از هم جدا شدند، مایع زیرین که غیرآلی بود دور ریخته شد و مایع فوقانی که مخلوطی از حلال و ماده آلی بود در ظرف مورد نظر ریخته شد. مجدداً ۳۰ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان به محلول اضافه شد و جداسازی انجام شد. بعد از تکرار جداسازی برای بار سوم، محلول استخراج شده از کاغذ صافی واتمن و ۱۰ گرم سولفات سدیم عبور داده شد. سپس به مقدار کافی سیلیکا ژل گرانولی به آن اضافه و به مدت ۱۵ دقیقه در همزن مغناطیسی هم زده شد تا هر گونه ماده قطبی موجود در محلول حذف گردد. پس از تبخیر حلال از محلول استخراج شده، مقدار گازوئیل به روش وزنی اندازه‌گیری شد (۲۷، ۲۸ و ۲۹). مکانیزم‌های مختلف حذف آلاینده توسط گیاه شامل استخراج گیاهی، تبخیر گیاهی، تخریب گیاهی و تخریب ریزوسفری می‌باشد. تبخیر گیاهی برای آن دسته از آلاینده‌های بسیار فرار کاربرد دارد که ثابت هنری^۱ آن‌ها بیش‌تر از ۱۰ می‌باشد و می‌تواند با استفاده از روش‌های سنتی هوادهی تبخیر شده و از

۵۶، برای گیاه خلر ۰/۳۵ و برای گیاه فستوکای بلند ۰/۴ در نظر گرفته شد. در آزمایش‌های گلدانی عمق ریشه برابر با عمق خاک گلدان در نظر گرفته می‌شود که در این پژوهش ۲۵ سانتی‌متر بود. بر اساس رابطه ۱، میانگین حجم آبیاری در هر نوبت در سال اول ۵۵۰ میلی‌لیتر و در سال دوم ۷۳۵ میلی‌لیتر به دست آمد. پس از محاسبه حجم آب آبیاری، آبیاری گلدان‌ها به وسیله آبیاری دستی انجام شد. زمان آبیاری بر اساس اندازه‌گیری رطوبت خاک به وسیله رطوبت‌سنج و براساس تخلیه مجاز رطوبتی تعیین گردید. رطوبت زمان آبیاری از حاصل ضرب تخلیه مجاز رطوبتی در رطوبت ظرفیت زراعی به دست آمد. این آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار و در دو سال اجرا شد که تیمارهای خاک شامل دو سطح گازوئیل ۱/۵ و ۳ درصد (نسبت وزن گازوئیل به وزن خاک) و تیمارهای آبیاری نیز دو سطح آب شیرین و پساب بودند. پس از اتمام آزمایش (سه ماه پس از کاشت) نمونه‌های خاک، گیاه و زهاب جهت آنالیز به آزمایشگاه منتقل شدند. غلظت گازوئیل در خاک، گیاه و زهاب به روش وزنی اندازه‌گیری شد. نمونه‌های تر خاک با استفاده از سدیم سولفات بی‌آب (Na_2SO_4) خشک شد. ۱۰ گرم از نمونه خشک شده با ۳۰ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان به عنوان حلال گازوئیل مخلوط شد و در لوله سانتریفیوژ قرار داده شد. مخلوط خاک و دی‌کلرومتان چهار مرتبه در دستگاه حمام آلتراسونیک با قدرت ۱۸۰ وات و هر بار به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد و هر مرتبه به وسیله سانتریفیوژ ۸۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از جداسازی محلول و خاک، محلول که شامل حلال و گازوئیل بود در داخل ظرف شیشه‌ای ریخته شد که قبلاً وزن خالی آن اندازه‌گیری شده بود و

1- Henry's constant

نسخه ۲۰ استفاده شد. در مورد مقایسه تأثیر تیمارها بر میزان حذف و نوع حذف گازوئیل از خاک از آنالیز واریانس یک‌طرفه و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار^۱ استفاده شد.

نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی توانایی گیاهان انتخاب‌شده برای گیاه‌پالایی خاک آلوده به گازوئیل، میزان حذف گازوئیل از خاک برای تمامی تیمارها محاسبه شد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود هر دو گیاه موفق به حذف گازوئیل از خاک شدند. در گیاه فستوکای بلند بیش‌ترین میزان حذف گازوئیل ۶۲/۴ درصد در تیمار گازوئیل ۱/۵ درصد- آب شیرین- سال ۹۷ به‌دست آمد و کم‌ترین آن در تیمار گازوئیل ۳ درصد- پساب- سال ۹۸ به میزان ۴۷/۹ درصد به‌دست آمد. استلیگا و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از گیاه فستوکای بلند غلظت آلاینده در خاک آلوده به هیدروکربن را ۶۰/۱-۴۹/۴ درصد کاهش دادند (۳۲). در گیاه خلر نیز حداکثر و حداقل حذف گازوئیل ۶۳/۰ و ۴۴/۲ درصد به ترتیب در تیمارهای گازوئیل ۱/۵ درصد-پساب-سال ۹۸ و گازوئیل ۳ درصد-آب شیرین-سال ۹۷ حاصل گردید. در پژوهش لرستانی و همکاران (۲۰۱۶)، میزان حذف آلودگی نفت خام با غلظت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد توسط گیاه خلر ۷۳/۳، ۶۲/۵، ۶۴/۸ و ۵۹/۱ درصد به دست آمد (۳۳). پس از محاسبه درصد پاکسازی خاک، میزان مشارکت هر یک از مکانیزم‌ها در پاکسازی خاک تعیین و با یکدیگر مقایسه شد.

خاک حذف شوند. مواد شیمیایی دارای ثابت هنری کوچک‌تر از ۱۰ به دلیل فراریت نسبتاً کم آن‌ها برای مکانیزم تبخیر گیاهی مناسب نیستند، مخصوصاً در شرایطی که تهویه و گردش هوا به میزان کافی نباشد (۳۰). به همین دلیل مکانیزم تبخیر گیاهی برای شرایط این آزمایش قابل چشم‌پوشی می‌باشد (۳۱). با استفاده از میزان گازوئیل اندازه‌گیری شده در زهاب، گیاه و خاک، میزان حذف گازوئیل توسط سایر مکانیزم‌ها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردید.

$$O = TD - E - L - S \quad (2)$$

که در آن، O مقدار گازوئیل حذف شده توسط مکانیزم تخریب گیاهی و ریزوسفری در انتهای آزمایش، TD مقدار کل گازوئیل موجود در خاک در ابتدای آزمایش، E مقدار گازوئیل جذب شده توسط گیاه در انتهای آزمایش، L مقدار گازوئیل موجود در زهاب جمع‌آوری شده در انتهای آزمایش و S مقدار گازوئیل باقی‌مانده در خاک در انتهای آزمایش می‌باشد. به‌منظور محاسبه درصد کاهش گازوئیل در خاک از رابطه ۳ استفاده شد.

$$\%Removal = \frac{D_i - D_f}{D_i} \times 100 \quad (3)$$

که در آن، D_i غلظت اولیه گازوئیل در خاک (میلی‌گرم بر گرم) و D_f غلظت نهایی گازوئیل باقی‌مانده در خاک (میلی‌گرم بر گرم) می‌باشد. پس از ارزیابی میزان موفقیت گیاه‌پالایی و اندازه‌گیری درصد حذف گازوئیل از خاک، درصد مشارکت هر یک از عوامل حذف‌کننده گازوئیل (O، E و L) در تیمارهای مختلف تعیین گردید و به‌منظور تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، از نرم‌افزار SPSS

1- LSD: Least Significant Difference

جدول ۳- درصد حذف گازوئیل طی گیاه‌پالایی توسط گیاه فستوکای بلند و خلر در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.

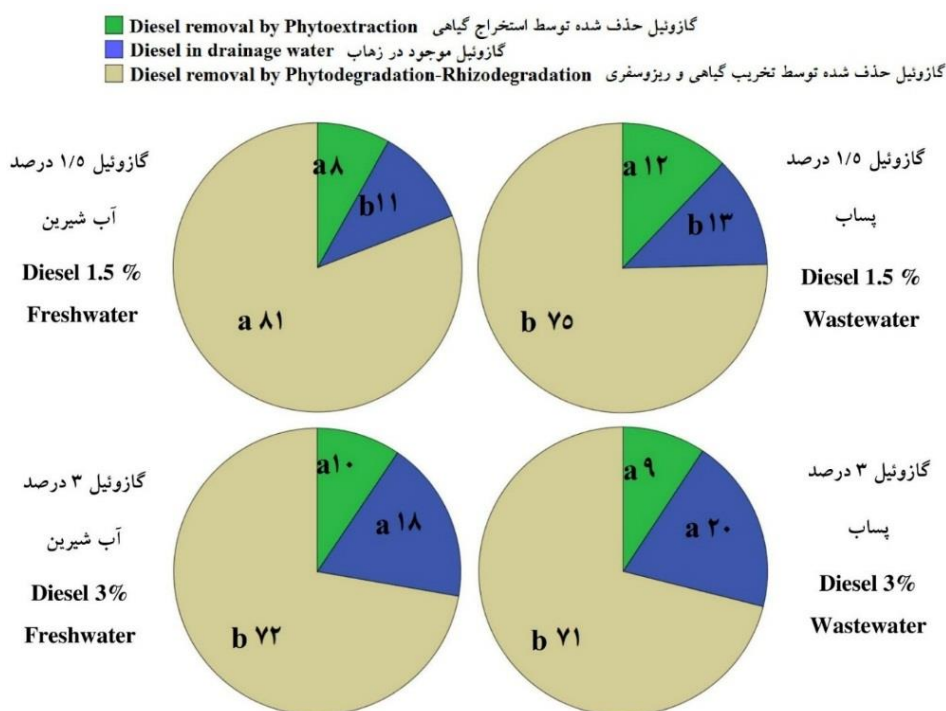
Table 3. Diesel Removal (%) during the phytoremediation by Tall fescue and Grass pea in 2018 and 2019.

سال	تیمار	درصد گازوئیل حذف‌شده توسط خلر Diesel Removal by Grass pea %	درصد گازوئیل حذف‌شده توسط فستوکای بلند Diesel Removal by Tall fescue %
۱۳۹۷ 2018	گازوئیل ۱/۵ درصد-آب شیرین D 1.5-Freshwater	54.5 B	62.4 A
	گازوئیل ۱/۵ درصد-پساب D 1.5-Wastewater	54.7 B	59.9 A
	گازوئیل ۳ درصد-آب شیرین D3-Freshwater	44.2 A	51.1 A
	گازوئیل ۳ درصد-پساب D3-Wastewater	45.9 A	50.6 A
۱۳۹۸ 2019	گازوئیل ۱/۵ درصد-آب شیرین D 1.5-Freshwater	60.6 A	56.4 A
	گازوئیل ۱/۵ درصد-پساب D 1.5-Wastewater	63.0 A	56.4 B
	گازوئیل ۳ درصد-آب شیرین D3-Freshwater	55.6 A	49.1 B
	گازوئیل ۳ درصد-پساب D3-Wastewater	55.4 A	47.9 B

حروف بیانگر اختلاف بین دو گیاه مختلف در تیمار یکسان و سال آزمایش یکسان می‌باشد. حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار و حروف مشابه بیانگر اختلاف غیرمعنی‌دار می‌باشد.

گروه خاصی از میکروب‌ها را در ریزوسفر تقویت کنند و حذف هیدروکربن‌ها را افزایش دهند. برخی از مطالعات نشان می‌دهند که نه تنها گونه‌های مختلف گیاهی، بلکه ارقام مختلف در یک گونه نیز اثرات متفاوتی بر میکروبیوتای ریزوسفر دارند (۳۶).

در سال ۹۷ عملکرد گیاه فستوکای بلند بهتر از گیاه خلر بود و در سال ۹۸ وضعیت برعکس بود (جدول ۳). تفاوت معنی‌دار بین گیاه‌پالایی توسط دو گونه گیاهی در پژوهش‌های دیگر نیز مشاهده شده است (۳۴ و ۳۵). این مطالعات نشان می‌دهد که گونه‌های مختلف گیاهی می‌توانند به‌طور انتخابی



شکل ۱- سهم عوامل مختلف در گیاه‌پالایی خاک آلوده به گازوئیل توسط گیاه فستوکای بلند- سال ۹۷.

حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار و حروف مشابه بیانگر اختلاف غیر معنی‌دار بین تیمارهای مختلف با رنگ یکسان می‌باشد.

Figure 1. The contribution of different factors in phytoremediation of diesel-contaminated soil by Tall fescue-2018. Different letters indicated significant differences and similar letters indicated non-significant differences between different treatments with the same color.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود تخریب گیاهی-ریزوسفری بیش‌ترین سهم را در پاکسازی خاک آلوده به گازوئیل دارد. در مطالعه‌ای مشابه، هوانگ و همکاران (۲۰۱۹) و حسین و همکاران (۲۰۱۸) گزارش دادند که گیاهان عامل اصلی در گیاه‌پالایی نیستند بلکه حذف هیدروکربن‌ها در حضور گیاه فستوکای بلند عمدتاً به اثر ریزوسفر نسبت داده می‌شود (۳ و ۳۷).

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود تخریب گیاهی-ریزوسفری بیش‌ترین سهم را در پاکسازی خاک آلوده به گازوئیل دارد. در مطالعه‌ای مشابه، هوانگ و همکاران (۲۰۱۹) و حسین و همکاران (۲۰۱۸) گزارش دادند که گیاهان عامل اصلی در گیاه‌پالایی نیستند بلکه حذف هیدروکربن‌ها در حضور گیاه فستوکای بلند عمدتاً به اثر ریزوسفر نسبت داده می‌شود (۳ و ۳۷).

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس تأثیر تیمارها بر مکانیزم‌های حذف گازوئیل-گیاه فستوکای بلند سال ۹۷.

Table 4. Results of variance analysis of the treatments effects on diesel removal mechanisms, Tall fescue-2018.

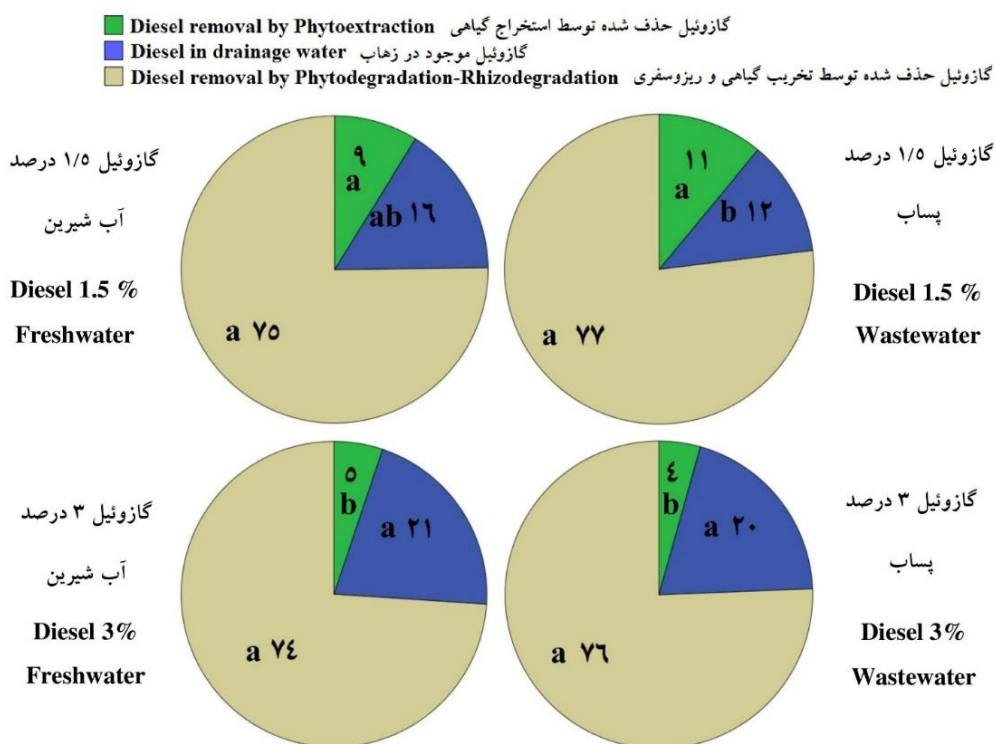
میانگین مربعات Mean of squares			درجه آزادی Degrees of freedom	منبع تغییرات Source of variation
گازوئیل حذف‌شده توسط مکانیزم تخریب گیاهی-ریزوسفری Diesel removal by Phytodegradation-Rhizodegradation	گازوئیل خارج شده توسط زهاب Diesel in drainage water	گازوئیل حذف‌شده توسط مکانیزم استخراج گیاهی Diesel removal by Phytoextraction		
57.28*	54.54*	8.54 ^{ns}	3	بین تیمارها Treatment
6.45	3.52	4.9	8	خطا (درون تیمارها) Error
6	27.24	24.85		ضریب تغییرات (درصد) CV

* در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد،^{ns} اختلاف معنی‌دار وجود ندارد

و گازوئیل ۱/۵ درصد-پساب نسبت به تیمارهای گازوئیل ۳ درصد سهم بیش‌تری در گیاه‌پالایی داشت که نشان‌دهنده اثر معنی‌دار تغییر غلظت و اثر غیرمعنی‌دار نوع آب آبیاری بر استخراج گیاهی آلاینده می‌باشد. استفاده از فاضلاب تصفیه نشده یا کم تصفیه‌شده می‌تواند منبع فراوان نیتروژن، فسفر و پتاسیم برای تولید محصولات زراعی باشد و مواد مغذی بالایی را برای بهبود رشد گیاه و کاهش اثرات آلودگی فراهم کند، اما در این آزمایش استفاده از پساب تصفیه‌شده تأثیر مثبتی بر فرایند گیاه‌پالایی نداشت.

کاهش معنی‌دار استخراج گیاهی با افزایش غلظت گازوئیل می‌تواند به علت سمیت ایجاد شده برای گیاه در غلظت زیاد گازوئیل باشد. اما در پژوهش‌های انجام شده توسط احمد و همکاران (۲۰۱۹) و احمد (۲۰۲۱) با افزایش غلظت گازوئیل میزان جذب توسط گیاه افزایش یافت (۴۲ و ۴۳). موفقیت مکانیزم استخراج گیاهی به توانایی گیاه در تجمع زیستی آلاینده‌های آلی در ساختار دیواره سلولی و تخریب اکسیداتیو آن بستگی دارد (۴۴). اگرچه مقدار جذب و تجزیه مستقیم گیاهی کم‌تر از سایر مکانیزم‌های پالایش خاک می‌باشد، اما درصدی از حذف آلودگی را بر عهده داشته است. نتایج نشان می‌دهد که در غشاهای گیاهان مورد مطالعه در این پژوهش مقداری از ترکیبات آلی منتقل شده است. پرماتوری و همکاران (۲۰۲۰) مشاهده کردند که ترکیبات با وزن مولکولی کم می‌توانند از خاک جذب‌شده و به برگ‌های گیاه منتقل شوند (۴۵).

طبق نتایج آنالیز واریانس، تأثیر تیمارها بر گازوئیل حذف‌شده توسط مکانیزم استخراج گیاهی معنی‌دار نبود. اما میزان گازوئیل خارج شده توسط زهاب تیمارهای گازوئیل ۳ درصد-آب شیرین و پساب به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای ۱/۵ درصد-آب شیرین و پساب بود که در پژوهش مندوزا و همکاران (۱۹۹۸) نیز افزایش شستشو مواد نفتی از خاک با افزایش غلظت آلاینده گزارش شده است (۳۸). هم‌چنین تأثیر تیمارها بر تخریب گیاهی-ریزوسفری معنی‌دار بود به‌طوری‌که تیمار گازوئیل ۱/۵ درصد-آب شیرین بیش‌ترین میزان پاکسازی از طریق این مکانیزم را داشت. در پژوهش شهریاری و همکاران (۲۰۰۶) افزایش غلظت آلاینده‌ها در خاک سبب کاهش تجزیه زیستی نفت در خاک دارای گیاه و بدون گیاه شد. طبق مشاهدات آن‌ها، تعداد باکتری‌ها در خاک‌هایی با غلظت بالاتر نفت خام، بیش‌تر از غلظت‌های کم‌تر نفت خام بود ولی این افزایش تعداد باکتری نتوانسته بود در کاهش مقدار آلودگی و تجزیه زیستی آن مؤثر باشد (۳۹). طبق گزارش کایکیوگلو و همکاران (۲۰۱۲) پساب تصفیه‌خانه شهری می‌تواند فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و فسفاتاز که آنزیم‌های مهم و تأثیرگذار بر تجزیه میکروبی آلاینده موجود در خاک هستند را کاهش دهد (۴۰ و ۴۱). در آزمایش دوم گیاه فستوکای بلند مانند آزمایش اول، استخراج گیاهی و زهاب نقش کم‌تری در خروج آلاینده از خاک داشتند (شکل ۲). با توجه به نتایج آنالیز واریانس (شکل ۲ و جدول ۵)، اثر تیمارها بر استخراج گیاهی معنی‌دار شد و مکانیزم استخراج گیاهی در تیمارهای گازوئیل ۱/۵ درصد-آب شیرین



شکل ۲- سهم عوامل مختلف در گیاه پالایی خاک آلوده به گازوئیل توسط گیاه فستوکای بلند-سال ۹۸.

حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار و حروف مشابه بیانگر اختلاف غیر معنی دار بین تیمارهای مختلف با رنگ یکسان می باشد.

Figure 2. The contribution of different factors in phytoremediation of diesel-contaminated soil by Tall fescue-2019. Different letters indicate significant differences and similar letters indicate non-significant differences between different treatments with the same color.

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس تأثیر تیمارها بر مکانیزم های حذف گازوئیل-گیاه فستوکای بلند سال ۹۸.

Table 5. Results of variance analysis of the treatments effects on diesel removal mechanisms, Tall fescue-2019.

میانگین مربعات Mean of squares			درجه آزادی Degrees of freedom	منبع تغییرات Source of variation
گازوئیل حذف شده توسط مکانیزم تخریب گیاهی-ریزوسفری Diesel removal by Phytodegradation-Rhizodegradation	گازوئیل خارج شده توسط زهاب Diesel in drainage water	گازوئیل حذف شده توسط مکانیزم استخراج گیاهی Diesel removal by Phytoextraction		
4.6 ^{ns}	49.73*	29.4*	3	بین تیمارها Treatment
17.63	10.9	2.82	8	خطا (درون تیمارها) Error
4.97	26.91	43.22		ضریب تغییرات (درصد) CV

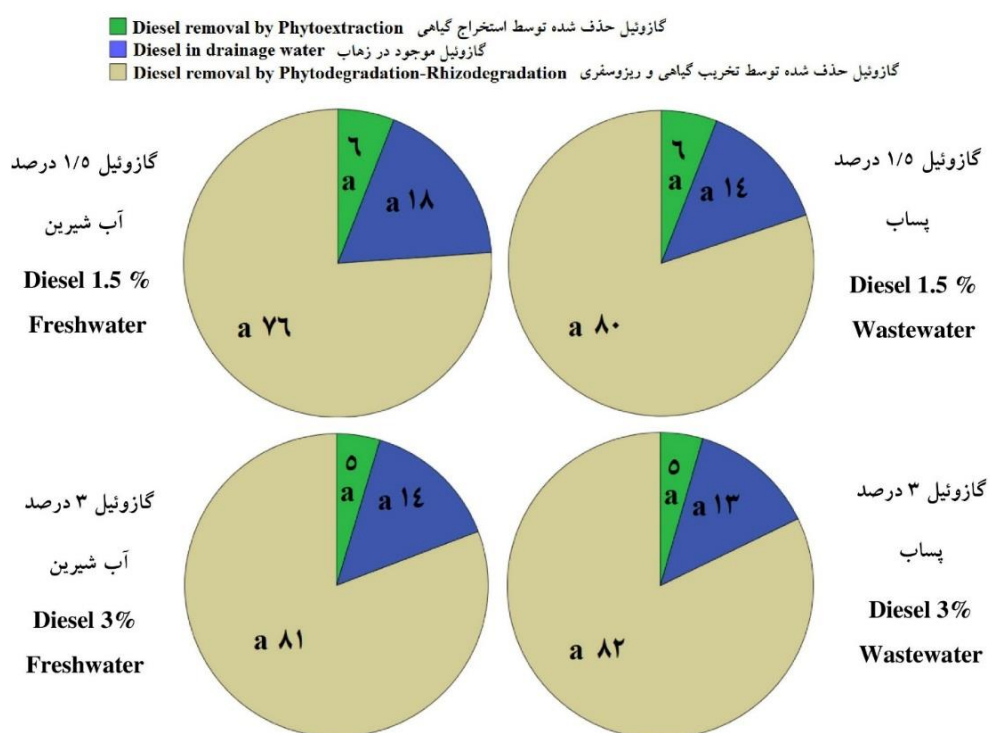
* در سطح پنج درصد اختلاف معنی دار وجود دارد، ^{ns} اختلاف معنی دار وجود ندارد

تیمارها می باشد که مقدار آن با نتایج به دست آمده در مطالعه جمراه و همکاران (۲۰۰۷) همخوانی دارد، آن ها میزان شسته شدن هیدروکربن از خاک را ۶/۸

آنالیز واریانس تأثیر تیمارها بر میزان گازوئیل حذف شده توسط زهاب نشان داد که تیمار گازوئیل ۱/۵ درصد- پساب به طور معنی داری کم تر از سایر

ترکیبات آلی مانند اسیدهای آمینه، قندها، آنزیم‌ها، اسیدهای آلی و کربوهیدرات‌ها از سیستم ریشه، جمعیت میکروبی در خاک و در نتیجه تخریب هیدروکربن‌ها را افزایش دهند (۴۷). به‌طور مشابه ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) ۷۶ تا ۸۰ درصد تخریب گازوئیل را در ریزوسفر گیاهان بومی مشاهده کردند که به‌وسیله باکتری‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن حاصل گردید (۴۸). به گفته نویسندگان، باکتری‌های ریزوسفر از ترکیبات آلی تولیدشده توسط گیاهان برای افزایش زیست‌توده و فعالیت متابولیکی استفاده می‌کنند.

درصد اعلام کردند (۳۶). تخریب گیاهی-ریزوسفری در هیچ‌کدام از تیمارها تفاوت معنی‌داری نداشت و مشابه آزمایش اول گیاه فستوکای بلند بیش‌ترین سهم را در پاکسازی خاک آلوده بر عهده داشت. در آزمایش اول گیاه خلر همانند گیاه فستوکای بلند تأثیرگذارترین مکانیزم در گیاه‌پالایی خاک آلوده به گازوئیل، تخریب گیاهی-ریزوسفری بود که بین تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۳). لیم و همکاران (۲۰۱۶) معتقدند که مکانیزم اصلی گیاه‌پالایی، تخریب توسط ریزوسفر است که مشابه نتایج این پژوهش می‌باشد (۴۶). گیاهان می‌توانند از طریق آزادسازی



شکل ۳- سهم عوامل مختلف در گیاه پالایی خاک آلوده به گازوئیل توسط گیاه خلر- سال ۹۷.

حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار و حروف مشابه بیانگر اختلاف غیرمعنی‌دار بین تیمارهای مختلف با رنگ یکسان می‌باشد.

Figure 3. The contribution of different factors in phytoremediation of diesel-contaminated soil by Grass pea-2018. Different letters indicate significant differences and similar letters indicate non-significant differences between different treatments with the same color.

مشاهده شد ولی مقدار آن کم گزارش شده است (۴۹ و ۵۰). اگرچه از و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که حلالیت هیدروکربن در آب کم است (۵ میلی‌گرم در لیتر برای نفت سنگین) و شسته شدن هیدروکربن‌های نفتی را مشکل بزرگی در نظر نگرفتند (۵۱)، اما در این پژوهش میزان شسته شدن گازوئیل چندین برابر جذب گازوئیل توسط گیاه بود.

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود افزایش دوز گازوئیل و تغییر نوع آب آبیاری تأثیر معنی‌داری بر درصد مشارکت مکانیزم مختلف پالایش خاک نداشت. در این آزمایش میزان جذب گیاهی کم‌تر از سایر مکانیزم‌های حذف گازوئیل بود. به‌طور مشابه، در مطالعات نیومن و رینولدز (۲۰۰۴) و موگین (۲۰۰۲) تخریب مستقیم هیدروکربن‌ها توسط گیاهان

جدول ۶- نتایج آنالیز واریانس تأثیر تیمارها بر مکانیزم‌های حذف گازوئیل- گیاه خلر سال ۹۷.

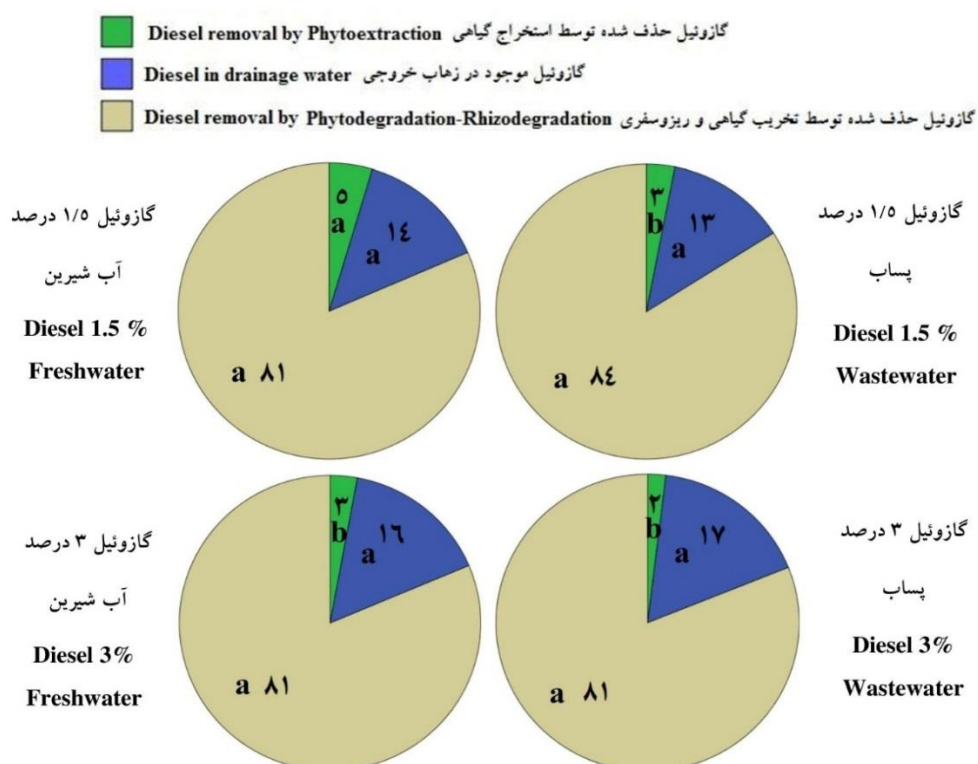
Table 6. Results of variance analysis of the treatments effects on diesel removal mechanisms, Grass pea-2018.

میانگین مربعات Mean of squares			درجه آزادی Degrees of freedom	منبع تغییرات Source of variation
گازوئیل حذف‌شده توسط مکانیزم تخریب گیاهی-ریزوسفری Diesel removal by Phytodegradation-Rhizodegradation	گازوئیل خارج‌شده توسط زهاب Diesel in drainage water	گازوئیل حذف‌شده توسط مکانیزم استخراج گیاهی Diesel removal by Phytoextraction		
20.43 ^{ns}	12.8 ^{ns}	1.87 ^{ns}	3	بین تیمارها Treatment
5.1	5.04	1.28	8	خطا (درون تیمارها) Error
3.81	17.89	22.91		ضریب تغییرات (درصد) CV

* در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد، ^{ns} اختلاف معنی‌دار وجود ندارد

و گزارش دادند که میزان زیادی از آلاینده در سیستم خاک باقی مانده است (۵۳). طبق نتایج کلر و همکاران (۲۰۰۸) شسته شدن هیدروکربن‌ها در خاک لومی حداقل بود (۰-۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (۵۴). در پژوهش هاجینسون و همکاران (۲۰۰۱) نیز تنها ۰/۰۲ درصد از لجن نفتی کهنه با آب آبیاری از پروفیل خاک شسته شد (۵۵). در آزمایش دوم گیاه خلر میزان استخراج گیاهی گازوئیل در تیمار گازوئیل ۱/۵ درصد- آب شیرین بیش‌ترین مقدار خود را داشت و حداقل استخراج گیاهی در تیمار گازوئیل ۳ درصد- پساب رخ داد. که نشان‌دهنده تأثیر منفی افزایش دوز آلاینده و آبیاری با پساب بر میزان جذب گیاه می‌باشد (جدول ۷).

با توجه به نتایج پژوهش مرکل و همکاران (۲۰۰۵) ترکیب هیدروکربن با محصولات تولیدشده در فعالیت‌های بیولوژیکی خاک، منجر به تشکیل امولسیون‌های نفت-آب و حرکت رو به پایین (شسته شدن) هیدروکربن‌های نفتی در خاک‌هایی می‌شود که از نظر میکروبی فعال هستند (۵۲). در نتیجه، در خاکی که گیاه کاشته شده (با فعالیت میکروبی بالا در ریزوسفر) نسبت به خاک بدون گیاه انتظار شستشوی بیش‌تری را داریم و این میزان از شسته شدن گازوئیل در خاک را می‌توان از جنبه‌های منفی گیاه‌پالایی در نظر گرفت. برخلاف نتایج این پژوهش، مکیتاش و همکاران (۲۰۱۷) مقدار کمی هیدروکربن در زهاب خارج‌شده از سیستم خاک شنی آلوده مشاهده کردند



شکل ۴- سهم عوامل مختلف در گیاه‌پالایی خاک آلوده به گازوئیل توسط گیاه خلر-سال ۹۸.

حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار و حروف مشابه بیانگر اختلاف غیرمعنی‌دار بین تیمارهای مختلف با رنگ یکسان می‌باشد.

Figure 4. The contribution of different factors in phytoremediation of diesel-contaminated soil by Grass pea-2019. Different letters indicate significant differences and similar letters indicate non-significant differences between different treatments with the same color.

است. آنان بیان کردند ریشه گیاه واسطه بین گیاه و میکروبه‌های خاک بوده و میزان تجزیه هیدروکربن به ویژگی‌های ریشه مانند سطح، توزیع و میزان رشد آن بستگی دارد (۵۶).

مطابق شکل ۴، تجزیه گیاهی و ریزوسفری بیش‌ترین نقش را در گیاه‌پالایی داشت. در پژوهش هو و همکاران (۲۰۰۱) نیز نقش تجزیه گیاهی پررنگ‌تر از آبشویی و جذب گیاهی گزارش شده

جدول ۷- نتایج آنالیز واریانس تأثیر تیمارها بر مکانیزم‌های حذف گازوئیل-گیاه خلر سال ۹۸.

Table 7. Results of variance analysis of the treatments effects on diesel removal mechanisms, Grass pea-2019.

میانگین مربعات Mean of squares			درجه آزادی Degrees of freedom	منبع تغییرات Source of variation
گازوئیل حذف شده توسط مکانیزم تخریب گیاهی-ریزوسفری Diesel removal by Phytodegradation-Rhizodegradation	گازوئیل خارج شده توسط زهاب Diesel in drainage water	گازوئیل حذف شده توسط مکانیزم استخراج گیاهی Diesel removal by Phytoextraction		
5.41 ^{ns}	9.81 ^{ns}	3.72*	3	بین تیمارها Treatment
4.4	4.54	0.83	8	خطا (درون تیمارها) Error
2.63	16.41	40.71		ضریب تغییرات (درصد) CV

* در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد،^{ns} اختلاف معنی‌دار وجود ندارد

بیش‌تر از تیمارهای غلظت ۱/۵ درصد بود و میزان تخریب ریزوسفری گازوئیل ۱/۵ درصد-آب شیرین در آزمایش گیاه فستوکای بلند به‌طور معنی‌دار بیش‌تر از سایر تیمارها بود. در سایر آزمایش‌ها تفاوت معنی‌داری بین غلظت‌های کم و زیاد مشاهده نشد که می‌توان نتیجه گرفت اختلاف دو سطح گازوئیل آن‌قدر زیاد نبوده است که منجر به ایجاد سمیت در گیاه و تأثیر بر جمعیت میکروبی خاک و عملکرد عوامل حذف‌کننده گازوئیل گردد. ارزیابی اثر کیفیت آب آبیاری بر مکانیسم‌های حذف گازوئیل از خاک نشان داد که خروج گازوئیل به‌وسیله زهاب در تیمار گازوئیل ۱/۵ درصد-پساب در آزمایش دوم گیاه فستوکای بلند به‌طور معنی‌داری کم‌تر از سایر تیمارها بود، استخراج گیاهی در آزمایش دوم گیاه خلر در تیمار گازوئیل ۱/۵ درصد-آب شیرین بیش‌ترین مقدار و در تیمار گازوئیل ۳ درصد-پساب کم‌ترین مقدار را داشت. در سایر موارد تفاوت معنی‌داری بین دو نوع آب آبیاری مشاهده نشد. می‌توان نتیجه گرفت عملکرد گیاهانی که با فاضلاب تصفیه‌شده آبیاری می‌شوند به درجه تصفیه و غلظت عناصر غذایی موجود در فاضلاب بستگی دارد. در این پژوهش پساب مورد استفاده، به دلیل تصفیه شدن، از نظر مواد مغذی ضعیف بود و تأثیر چشمگیری در عملکرد مکانیسم‌های مختلف گیاه‌پالایی ایجاد نکرد. در تمامی آزمایش‌ها مکانیسم تجزیه گیاهی-ریزوسفری بیش‌ترین سهم را در حذف گازوئیل از خاک داشت که نشان‌دهنده نقش مؤثر ریشه و میکروارگانیسم‌های خاک در فرآیند گیاه‌پالایی است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان به ترتیب از دانشگاه بوعلی‌سینا همدان و پیام‌نور جهت حمایت مالی و مساعدت در اجرای آزمایش‌ها، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

در گیاه خلر میزان شستشوی ترکیبات نفتی تحت تأثیر میزان گازوئیل و آب آبیاری قرار نگرفت و همان‌طور که ون‌اپس و همکاران (۲۰۰۶) گزارش دادند میزان شسته شدن ترکیبات نفتی بیش‌تر به ماهیت، قطبیت و آب‌گریزی آن ترکیبات بستگی دارد (۵۷). همان‌طور که در شکل‌های ۱ تا ۴ مشاهده می‌شود مکانیسم جذب گیاهی کم‌ترین نقش را در حذف آلاینده از خاک داشت. جذب هیدروکربن‌ها توسط گیاه بسیار کم و محدود به ترکیبات با وزن مولکولی کم است. نوع هیدروکربن و وزن مولکولی ترکیبات آن نقش اساسی در عملکرد گیاه‌پالایی خواهد داشت. بسیاری از هیدروکربن‌های نفتی دارای مولکول‌های بزرگ با وزن مولکولی بالا و چربی‌دوست هستند و معمولاً از ریشه گیاه جدا می‌شوند، به همین دلیل تخریب گیاهی و تبخیر گیاهی مسیرهای جزئی حذف هیدروکربن از خاک در نظر گرفته می‌شوند (۳۱). فرآورده‌های نفتی مانند سوخت گازوئیل ماهیت بسیار پیچیده‌ای دارند و معمولاً از بیش از ۱۰۰ ترکیب تشکیل شده‌اند. ترکیبات شیمیایی بسته به ویژگی‌های نفت خام و تبدیلات شیمیایی می‌تواند بسیار متغیر باشد، بنابراین رفتار آلاینده نفتی در فرایند گیاه‌پالایی بسته به نوع ترکیبات تشکیل‌دهنده آن متفاوت خواهد بود (۵۸).

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج پژوهش مشخص گردید که گونه‌های مختلف گیاهی، فرآیند گیاه‌پالایی متفاوتی را به عمل می‌آورند. غلظت آلاینده و کیفیت آب آبیاری از دیگر پارامترهایی هستند که بر مقدار و نوع فرایند گیاه‌پالایی تأثیرگذار می‌باشند. در آزمایش دوم مشخص شد گیاه فستوکای بلند مکانیسم استخراج گیاهی در غلظت ۱/۵ درصد گازوئیل بیش‌تر از غلظت ۳ درصد بود، میزان گازوئیل در زهاب خروجی در تیمارهای ۳ درصد آزمایش فستوکای بلند

داده‌ها و اطلاعات

مبنای داده‌ها و اطلاعات مقاله حاضر، رساله دکتری نویسنده اول است.

تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به شرح زیر است:

مشارکت شیوا متقی به‌عنوان نویسنده اول مقاله کشت گلخانه‌ای، داده‌برداری، تفسیر و تحلیل داده‌های مقاله و ویرایش متن اولیه مقاله می‌باشد. مشارکت امید بهمنی به‌عنوان نویسنده دوم و مسئول مقاله، نظارت و راهنمایی بر روند انجام

پژوهش، بررسی و کنترل نتایج و ویرایش نهایی متن مقاله می‌باشد.

مشارکت وحید اطلسی پاک به‌عنوان نویسنده سوم مقاله تأمین امکانات و تفسیر و تحلیل آماری داده‌های مقاله می‌باشد.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این مقاله حاصل نتایج بخشی از رساله دوره دکتری می‌باشد که تحت حمایت مالی دانشگاه بوعلی‌سینا همدان در قالب گرنت دانشجوی و گرنت استاد راهنما انجام گردیده است.

منابع

1. Varjani, S.J. 2017. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresour. Technol.* 223: 277-286.
2. Naeem, U., and Qazi, M.A. 2020. Leading edges in bioremediation technologies for removal of petroleum hydrocarbons. *Environmental Science and Pollution Research.* 27: 22. 27370-27382.
3. Hussain, I., Puschenreiter, M., Gerhard, S., Schöftner, P., Yousaf, S., Wang, A., Syed, J.H., and Reichenauer, T.G. 2018. Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: improvement opportunities and field applications. *Environ. Exp. Bot.* 147: 202-219.
4. O'Brien, P.L., DeSutter, T.M., Casey, F.X., Wick, A.F., and Khan, E. 2017. Evaluation of soil function following remediation of petroleum hydrocarbons—a review of current remediation techniques. *Current Pollution Reports.* 3: 3. 192-205.
5. Kluk, D., and Steliga, T. 2016. Evaluation of toxicity changes in soil contaminated with nickel and petroleum-derived substances in phytoremediation processes. *Nafta-Gaz.* 4: 230-241.
6. Mench, M., Lepp, N., Bert, V., Schwitzguébel, J.P., Gawronski, S.W., Schröder, P., and Vangronsveld, J. 2010. Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *Journal of Soils and Sediments*, 10: 6. 1039-1070.
7. Martins, C.D.C., Liduino, V.S., Oliveira, F.J.S., and Sérulo, E.F.C. 2014. Phytoremediation of soil multi-contaminated with hydrocarbons and heavy metals using sunflowers. *Int. J. Eng. Tech. IJET-IJENS.* 5:14. 1-6.
8. Xie, W., Zhang, Y., Li, R., Yang, H., Wu, T., Zhao, L., and Lu, Z. 2017. The responses of two native plant species to soil petroleum contamination in the Yellow River Delta. *Environ. Sci. Poll. Res.* 24: 31. 24438-24446.
9. Liu, R., Jadeja, R.N., Zhou, Q., and Liu, Z. 2012. Treatment and remediation of petroleum-contaminated soils using selective ornamental plants. *Environmental Engineering Science.* 29: 6. 494-501.

10. Bento, R.A., Saggin-Júnior, O.J., Pitard, R.M., Stralio, R., da Silva, E.M.R., Tavares, S.R.D.L., and Volpon, A.G.T. 2012. Selection of leguminous trees associated with symbiotic microorganisms for phytoremediation of petroleum-contaminated soil. *Water, Air, and Soil Pollution*. 223: 9. 5659-5671.
11. Hawrot-Paw, M., Ratomski, P., Mikiciuk, M., Staniewski, J., Koniuszy, A., Ptak, P., and Golimowski, W. 2019. Pea cultivar Blauwschokker for the phytostimulation of biodiesel degradation in agricultural soil. *Environ. Sci. Poll. Res.* 26: 33. 34594-34602.
12. Borowik, A., Wyszowska, J., Gałazka, A., and Kucharski, J. 2019. Role of *Festuca rubra* and *Festuca arundinacea* in determining the functional and genetic diversity of microorganisms and of the enzymatic activity in the soil polluted with diesel oil. *Environ. Sci. Poll. Res.* 26: 27. 27738-27751.
13. Guo, M., Gong, Z., Miao, R., Jia, C., Rookes, J., Cahill, D., and Zhuang, J. 2018. Enhanced polycyclic aromatic hydrocarbons degradation in rhizosphere soil planted with tall fescue: bacterial community and functional gene expression mechanisms. *Chemosphere* 212: 15-23.
14. Lee, Y.Y., Seo, Y., Ha, M., Lee, J., Yang, H., and Cho, K.S. 2021. Evaluation of rhizoremediation and methane emission in diesel-contaminated soil cultivated with tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Environmental Research*. 194: 110606.
15. Wei, Y., Wang, Y., Duan M., Han, J., and Li, G. 2019. Growth tolerance and remediation potential of six plants in oil-polluted soil. *J. Soils Sediments*. 19: 3773-3785.
16. Shan, B.Q., Zhang, Y.T., Cao, Q.L., Kang, Z.Y., and Li, S.Y. 2014. Growth responses of six leguminous plants adaptable in Northern Shaanxi to petroleum contaminated soil. *Huan jing ke xue = Huanjing kexue*. 35: 3. 1125-1130.
17. Khashij, S., Karimi, B., and Makhdoumi, P. 2018. Phytoremediation with *Festuca arundinacea*: a mini review. *International Journal of Health and Life Sciences*. 4: 2. e86625.
18. Ganjegunte, G., Ulery, A., Niu, G., and Wu, Y. 2018. Treated urban wastewater irrigation effects on bioenergy sorghum biomass, quality, and soil salinity in an arid environment. *L. Degrad. Dev.* 29: 3. 534-542.
19. Bremner, J.M. 1982. Total nitrogen. *Methods of soil analysis*. Am. Soc. Agron. Monogr. 10: 2. 594-624.
20. Olsen, S.R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.
21. Richards, L.A. (Ed.). 2012. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Scientific Publishers.
22. Robertson, G.P., Coleman, D.C., Sollins, P., and Bledsoe, C.S. (Eds.). 1999. *Standard soil methods for long-term ecological research (Vol. 2)*. Oxford University Press on Demand.
23. Walkley, A., and 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: 1. 29-38.
24. Ayers, R.S., and Westcot, D.W. 1985. *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rev. 1. FAO, Rome.
25. Alizadeh, A. 2018. *Soil, water, plant relationship*. Emam Reza University Publication, Mashhad, Iran. 470p. (In Persian)
26. Anyasi, R.O., and Atagana, H.I. 2018. Profiling of plants at petroleum contaminated site for phytoremediation. *International journal of phytoremediation*. 20: 4. 352-361.
27. Adeniji, A.O., Okoh, O.O., and Okoh, A.I. 2017. Analytical methods for the determination of the distribution of total petroleum hydrocarbons in the water and sediment of aquatic systems: A review. *Journal of Chemistry*. 2017: 1-14.

28. Matthew, M. 2009. A comparison study of gravimetric and ultraviolet fluorescence methods for the analysis of total petroleum hydro-carbons in surface water. (Doctoral dissertation, Northeastern University).
29. Ololade, I., Lajide, L., and Amoo, I. 2009. Spatial trends of petroleum hydrocarbons in water and sediments. *Open Chemistry*. 7: 1. 83-89.
30. Kamath, R., Rentz, J.A., Schnoor, J.L., and Alvarez, P.J.J. 2004. Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soils: principles and applications. *Studies in surface science and catalysis*. 151: 447-478.
31. Asghar, H.N., Rafique, H.M., Zahir, Z.A., Khan, M.Y., Akhtar, M.J., Naveed, M., and Saleem, M. 2016. Petroleum hydrocarbons-contaminated soils: remediation approaches. *Soil science: agricultural and environmental prospective*. Springer. Cham. pp. 105-129.
32. Steliga, T., and Kluk, D. 2020. Application of *Festuca arundinacea* in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 194: 110409.
33. Lorestni, B., Noori, R., and Kolahchi, N. 2016. Bioremediation of soil contaminated with light crude oil using Fabaceae family. *Journal of Environmental Science and Technology*. 18: 2. 101-108. (In Persian)
34. Jiang, M., Liu, S., Li, Y., Li, X., Luo, Z., Song, H., and Chen, Q. 2019. EDTA-facilitated toxic tolerance, absorption and translocation and phytoremediation of lead by dwarf bamboos. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 170: 502-512.
35. Liu, W., Hou, J., Wang, Q., Yang, H., Luo, Y., and Christie, P. 2015. Collection and analysis of root exudates of *Festuca arundinacea* L. and their role in facilitating the phytoremediation of petroleum-contaminated soil. *Plant and Soil*. 389: 1. 109-119.
36. Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Hassan, H. and Al-Oraimi, S. 2007. Petroleum contaminated soil in Oman: Evaluation of bioremediation treatment and potential for reuse in hot asphalt mix concrete. *Environmental monitoring and assessment*. 124: 1. 331-341
37. Huang, L., Chen, D., Zhang, H., Song, Y., Chen, H., and Tang, M. 2019. Funneliformis mosseae enhances root development and Pb phytostabilization in *Robinia pseudoacacia* in Pb-contaminated soil. *Frontiers in Microbiology*. 2591.
38. Mendoza, R.E. 1998. Hydrocarbon leaching, microbial population, and plant growth in soil amended with petroleum. *Bioremediation Journal*. 1: 3. 223-231.
39. Shahriari, M., Savaghebi Firouzabadi, G., Minaei Tehrani, D., and Padidaran, M. 2006. The effect of mixed plants alfalfa (*Medicago Sativa*) and fescue (*Festuca Arundinacea*) on the phytoremediation of light crude oil in soil. *Environmental sciences*. 4: 13. 33-40. (In Persian)
40. Haritash, A.K., and Kaushik, C.P. 2009. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. *Journal of hazardous materials*. 169: 1-3. 1-15.
41. Kayikcioglu, H.H. 2012. Short-term effects of irrigation with treated domestic wastewater on microbiological activity of a Vertic xerofluent soil under Mediterranean conditions. *Journal of environmental management*. 102: 108-114.
42. Ahmad, A. 2021. Phytoremediation of heavy metals and total petroleum hydrocarbon and nutrients enhancement of *Typha latifolia* in petroleum secondary effluent for biomass growth. *Environmental Science and Pollution Research*. pp. 1-10.
43. Ahmad, A., Sreedhar Reddy, S., and Rumana, G. 2019. Model for bioavailability and metal reduction from soil amended with petroleum wastewater by rye-grass L. *International journal of phytoremediation*. 21: 5. 471-478.
44. Kvesitadze, G., Khatisashvili, G., Sadunishvili, T., and Ramsden, J.J. 2006. Biochemical mechanisms of detoxification in higher plants: basis of

- phytoremediation. Springer Science & Business Media.
45. Prematuri, R., Mardatin, N.F., Irdiastuti, R., Turjaman, M., Wagatsuma, T. and Tawaraya, K. 2020. Petroleum hydrocarbons degradation in contaminated soil using the plants of the Aster family. *Environmental Science and Pollution Research*. 27: 4. 4460-4467.
46. Lim, M.W., Von Lau, E., and Poh, P.E. 2016. A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil-Present works and future directions. *Marine pollution bulletin*. 109: 1. 14-45.
47. Van Hecke, M.M., Treonis, A.M., and Kaufman, J.R. 2005. How does the fungal endophyte *Neotyphodium coenophialum* affect tall fescue (*Festuca arundinacea*) rhizodeposition and soil microorganisms?. *Plant and soil*. 275: 1. 101-109.
48. Zhang, X., Wang, Z., Liu, X., Hu, X., Liang, X., and Hu, Y. 2013. Degradation of diesel pollutants in Huangpu-Yangtze River estuary wetland using plant-microbe systems. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 76: 71-75.
49. Newman, L.A., and Reynolds, C.M. 2004. Phytodegradation of organic compounds. *Current opinion in Biotechnology*. 15: 3. 225-230.
50. Mougín, C. 2002. Bioremediation and phytoremediation of industrial PAH-polluted soils. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 22: 5. 1011-1043.
51. Eze, M.O., and George, S.C. 2020. Ethanol-blended petroleum fuels: implications of co-solvency for phytotechnologies. *RSC Advances*, 10: 11. 6473-6481.
52. Merkl, N., Schultze-Kraft, R., and Arias, M. 2005. Influence of fertilizer levels on phytoremediation of crude oil-contaminated soils with the tropical pasture grass *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex a. rich.) stapf. *International Journal of Phytoremediation*. 7: 3. 217-230.
53. McIntosh, P., Schulthess, C.P., Kuzovkina, Y.A., and Guillard, K. 2017. Bioremediation and phytoremediation of total petroleum hydrocarbons (TPH) under various conditions. *International journal of phytoremediation*, 19: 8. 755-764.
54. Keller, J., Banks, M.K., and Schwab, A.P. 2008. Effect of soil depth on phytoremediation efficiency for petroleum contaminants. *J. Environ. Sci. Health. Part A, Toxic/Hazard Subst. Environ. Eng.* 43: 1. 1-9.
55. Hutchinson, S.L., Schwab, A.P., and Banks, M.K. 2001. Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of irrigation techniques and scheduling. *Journal of environmental quality*. 30: 5. 1516-1522.
56. Hou, F.S.L., Milke, M.W., Leung, D.W.M., and MacPherson, D.J. 2001. Variations in phytoremediation performance with diesel-contaminated soil. *Environmental technology*. 22: 2. 215-222.
57. Van Epps, A. 2006. Phytoremediation of petroleum hydrocarbons. Environmental Protection Agency, US.
58. Lee, S.L., Hagwall, M., Delfino, J.J., and Rao, P.S.C. 1992. Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons from diesel fuel into water. *Environmental Science and Technology*. 26: 2104-2110.

