Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Studying Behavior of Runoff Generation in a Gasoil Contaminated Soils due to Inoculation of Soil Microorganism

Azam Mumzaei [1] | Seyed Hamidreza Sadeghi ✉ [2] | Behrouz Zarei Darki [3] | Mehdi Homaee [4]

1. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: azammumzai@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: sadeghi@modares.ac.ir
3. Department of Marine Biology, Faculty of Marine Science, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: zareidarki@modares.ac.ir
4. Department of Mining and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: mhomaee@modares.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 16, 2023

Revised: May. 11, 2023

Accepted: June. 24, 2023.

Published online: July. 23, 2023

Keywords:
Biological Crust,
Petroleum Pollutants,
Runoff Control,
Soil and Water Conservation.

ABSTRACT

Runoff is one of the most important hydrological processes in ecosystems, which is very important in the management of water and soil resources. Although the use of soil microorganisms as soil inoculants in the bioengineering management of runoff has been confirmed, the use of soil microorganisms to control runoff in soils contaminated with petroleum has not been considered. Therefore, in order to evaluate inoculation of soil Bacteria, Cyanobacteria and fungi in reducing runoff in soil contaminated with petroleum, the present study was carried at plots of 0.5×0.5 m with slope of some 25% and level of 20000 mg kg^{-1} of gasoil and control contamination in three replicates. The plots will be then subjected to rainfall intensity of some 35 mm h^{-1} and duration of 30 min installed at the Rainfall Simulation Laboratory of Tarbiat Modares University at Faculty of Natural Resources. The results showed that the inoculation treatments, although there was no significant difference compared to the control treatment ($P>0.05$) except for the start of runoff ($P<0.05$), improved the components of runoff. The comparison of the mean of the study variables showed that the bacteria, cyanobacteria, fungi, bacteria+fungi, bacteria+cyanobacteria, cyanobacteria+fungi, and bacteria+cyanobacteria+fungi caused +47.10, -0.08, -10.72, -24.86, +14.85, +49.88 and +27.88 percent changes in runoff start time, +4.58, -54.04, +65.19, +72.20, -41.36, -84. 53 and +40.15 percent changes in runoff volume, and +4.75, +54.06 and -65.15, +72.28, -41.39 and -84.55 and +40.20 percent changes in runoff coefficient, respectively. The results of the research indicated the relative synergistic performance of the combination treatment of cyanobacteria + fungi in reducing the effect of gasoil on runoff properties. Finally, the results of the present study showed that the inoculation of native soil bacteria, cyanobacteria, and fungi can be an efficient and sustainable biological technology to improve runoff characteristics in areas contaminated with petroleum.

Cite this article: Mumzaei, A., Sadeghi, S.H.R., Zarei Darki, B., & Homaee, M. (2023). Studying Behavior of Runoff Generation in a Gasoil Contaminated Soils due to Inoculation of Soil Microorganism, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (5), 843-858. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.357868.669483

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.357868.669483

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۵ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

رفتارسنجی تولید رواناب در خاک‌های آلوده به گازوییل در اثر تلقیح ریزموجودات خاک‌زی

اعظم مومزائی[۱] | سید حمیدرضا صادقی[۲] ✉ | بهروز زارعی دارکی[۳] | مهدی همایی[۴]

۱. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، رایانامه: azammumzai@modares.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، رایانامه: sadeghi@modares.ac.ir
۳. گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده علوم‌دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، رایانامه: zareidarki@modares.ac.ir
۴. گروه مهندسی معدن و محیط زیست، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، رایانامه: mhomaee@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۵/۱

کلیدواژه‌ها:
آلاینده‌های نفتی،
پوسته‌زیستی،
حفاظت خاک‌وآب،
مهار رواناب.

چکیده

رواناب یکی از مهم‌ترین فرآیندهای هیدرولوژیکی در بوم‌سازگان می‌باشد که مهار آن اهمیت بسیاری در مدیریت از منابع خاک‌وآب دارد. اگرچه به‌کارگیری ریزموجودات خاک‌زی به‌عنوان تلقیح‌کننده‌های خاک در مدیریت زیست‌مهندسی رواناب مورد تأیید قرار گرفته، اما کاربست آن‌ها در مهار رواناب در خاک آلوده به مواد نفتی موردتوجه قرار نگرفته است. ازاین‌رو به‌منظور ارزیابی تلقیح باکتری‌ها، سیانوباکتری‌ها و قارچ خاک‌زی در کاهش رواناب در خاک آلوده به مواد نفتی، پژوهش حاضر در مقیاس کرت با ابعاد نیم در نیم متر با شیب حدود ۲۵ درصد، میزان آلودگی ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گازوییل و شاهد با سه تکرار، شدت بارش حدود ۳۵ میلی‌متر بر ساعت با دوام ۳۰ دقیقه تحت شبیه‌سازی باران در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. نتایج نشان داد که تیمارهای تلقیحی باعث بهبود مؤلفه‌های رواناب شدند، اگرچه اختلاف عملکردی آماری معنی‌دار نسبت به تیمار شاهد ($P>0/05$) جز در زمان شروع رواناب ($P<0/05$) نداشتند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمارهای باکتری، سیانوباکتری، قارچ، مجموع باکتری و قارچ، باکتری و سیانوباکتری، سیانوباکتری و قارچ، باکتری، سیانوباکتری و قارچ به‌ترتیب باعث افزایش ۴۷/۱۰، کاهش ۰/۰۸، ۱۰/۷۲، ۲۴/۸۶، افزایش ۱۴/۸۵، ۴۹/۸۸ و ۲۷/۸۸ درصدی زمان شروع رواناب، افزایش ۴/۵۸، کاهش ۵۴/۰۴، ۶۵/۱۹، افزایش ۷۲/۲۰، کاهش ۴۱/۳۶، ۸۴/۵۳ و افزایش ۴۰/۱۵ درصدی حجم رواناب و افزایش ۴/۷۵، کاهش ۵۴/۰۶، ۶۵/۱۵، افزایش ۷۲/۲۸، کاهش ۴۱/۳۹، ۸۴/۵۵ و افزایش ۴۰/۲۰ درصدی ضریب رواناب شدند. نتایج این پژوهش دلالت بر عملکرد نسبی هم‌افزایی تیمار سیانوباکتری+قارچ در کاهش اثر گازوییل بر تولید رواناب داشت. در نهایت نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تلقیح باکتری، سیانوباکتری و قارچ خاک‌زی بومی می‌تواند یک فناوری زیستی کارآمد و پایدار برای بهبود مؤلفه‌های رواناب در راستای حفاظت از مناطق آلوده به مواد نفتی باشد.

استناد: مومزائی، اعظم؛ صادقی، سیدحمیدرضا؛ زارعی دارکی، بهروز و همایی، مهدی (۱۴۰۲). رفتارسنجی تولید رواناب در خاک‌های آلوده به گازوییل در اثر تلقیح ریزموجودات خاک‌زی. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۵)، ۸۴۳-۸۵۸. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.357868.669483

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.357868.669483

© نویسندگان.

مقدمه

از نمایه‌های اصلی تخریب زمین[۱] تولید سریع و حجیم رواناب[۲] بوده که با هدررفت منابع آب و خسارت‌های ناشی از تولید رسوب و سیلاب، معیشت پایدار جوامع و امنیت غذایی را تهدید می‌کند (Kheirfam et al. 2017a). بنابراین ضرورت بررسی همه جانبه عوامل مؤثر در آن در اولویت قرار دارد. علاوه بر تولید رواناب و هدررفت خاک[۳] ناشی از فرسایش[۴]، در اثر فرآیندهای محیط‌زیستی و فعالیت‌های انسانی، خاک در معرض آلاینده‌های مختلف حاصل از استخراج معدن، فاضلاب‌های شهری و صنعتی، دفع زباله و پسماند، حمل و نقل، پالایش و انتقال نفت، تولید صنعتی، استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها در کشاورزی قرار می‌گیرد (Varjani and Upasan, ; Koolivand et al. 2019 2017). آلودگی نفتی معمولاً در اطراف پالایشگاه‌ها و معادن کشف نفت، نشت ترکیبات نفتی از مخازن فرسوده ذخیره‌سازی پالایشگاه‌های نفتی و خطوط انتقال نفت و نیز به‌علت بارگیری یا خالی‌کردن نفت در تانکرها و دفع مواد زائد نفتی در خاک ایجاد می‌شود (Elinskiy et Falciglia and Vagliasindi, 2015; al. 2020). آلودگی‌های نفتی به‌سبب سمی بودن، وارد شدن به زنجیره‌غذایی و ایجاد بیماری در موجودات زنده به‌ویژه انسان (Varjani and Upasan, 2017) و آلودگی منابع خاک‌وآب زیرزمینی و سطحی به یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های حامیان محیط‌زیست تبدیل شده‌است (Rathod et al. 2022; Al-Abadi, 2023). متورم شدن خاک ناشی از وجود هیدروکربن‌های نفتی[۵] باعث انسداد خلل و فرج خاک و کاهش اندازه منافذ شده و در نتیجه کاهش میزان نفوذ آب به درون خاک می‌شود (Devatha et al. 2019). آلودگی نفتی با ایجاد آب‌گریزی[۶] و با دفع آب در سطح خاک، سبب کاهش نفوذپذیری و ظرفیت نفوذ آب به خاک، کاهش نگه‌داشت آب و افزایش رواناب سطحی می‌شوند و شرایط رشد گیاه مختل و به طور بالقوه باعث فرسایش خاک می‌شود (Ferreira et al. 2016; Muller et al. 2019). هم‌چنین احاطه شدن ذرات خاک با ترکیبات نفتی باعث لغزش آسان ذرات خاک روی یکدیگر و کاهش انسجام و مقاومت خاک می‌شود (دریایی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Ahmadi et al. 2021; Safehian et al. 2018 ;Chen et al. 2022) به‌گونه‌ای که با تغییر در آب‌گریزی و نفوذپذیری خاک سبب کاهش زمان آغاز رواناب، افزایش تولید رواناب، افزایش ضریب رواناب حتی به مقدار سه تا سه و نیم برابر و افزایش هدررفت خاک در مقایسه با خاک‌های غیرآلوده می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴). بنابراین با توجه به تأثیر ترکیبات نفتی بر ویژگی‌های هیدرولوژیک خاک، تولید رواناب و فرسایش خاک، از مشکلات مناطق آلوده می‌باشد. ازاین‌رو بررسی تأثیر ترکیبات نفتی بر گسترش فرسایش خاک و تولید رواناب، با توجه به پیچیدگی فرآیندهای حاکم بر آن‌ها و اتخاذ یک راه‌کار مدیریتی و حفاظتی صحیح در حفظ و تثبیت خاک و آب ضروری است.

امروزه روش‌های زیستی یکی از راهکارهای مناسب و کارآمد در مهار فرسایش خاک و تولید رواناب در مراحل ابتدایی فرسایش تلقی می‌شود (صادقی و همکاران، ۱۴۰۰). طی سال‌های گذشته استفاده از ریزموجودات خاک‌زی[۷] از جمله باکتری‌ها[۸]، سیانوباکتری‌ها[۹] و قارچ‌ها[۱۰] به‌عنوان مهندسین و حلقه‌ی اول زنجیره زیستی بوم‌سازگان در پوسته‌های‌زیستی[۱۱] گزارش شده است (Kheirfam ; Adessi et al. 2018 et al. 2017). پوسته‌های‌زیستی خاک علی‌رغم این‌که بخش کوچکی از نیم‌رخ خاک را تشکیل می‌دهند، نقش مهمی در فرآیندهای هیدرولوژیکی و تبادل مواد بین خاک، بر عهده دارند. این امر مهم مستلزم لحاظ کردن نقش آن‌ها در فرآیندهای هیدرولوژیک و تغییر ویژگی‌های خاک است. در همین راستا، مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با نقش پوسته‌های زیستی بر حاصلخیزی (Tucker et al. 2017 ;Li et al. 2012)، پایداری (Miralles et al. 2013; Bullard et al. 2018)، آب‌گریزی (Chamizo et al. 2020 ; Fisher et al. 2010)، شرکت در چرخه عناصر نیتروژن، کربن و فسفر (خیرفام و همکاران، ۱۳۹۶؛ Kheirfam et al. 2020 ;Barger et al. 2016) بهبود نفوذپذیری (Sadeghi et al. 2015a; Bowker et al. 2018)، نگه‌داشت رطوبت (Chamizo et al. ; Adessi et al. 2018)

---

[1]. Land Degradation
[2]. Runoff
[3]. Soil Loss
[4]. Soil Erosion
[5]. Petroleum hydrocarbon
[6]. Hydrophobicity
[7]. Soil Microorganisms
[8]. Bacteria
[9]. Cyanobacteria
[10]. Fungi
[11]. Biological Crusts

2012)، افزایش ماده آلی (Havrilla et al. 2020) انجام شده است. هم‌چنین ریزموجودات خاک‌زی به‌منظور تخریب زیستی آلاینده‌های معدنی و آلی به‌ویژه ترکیبات نفتی از محیط‌زیست، استفاده می‌شوند که با ترشح آنزیم‌ها، از آلاینده‌های خاک به‌عنوان منبع غذایی و انرژی استفاده می‌کنند (نوروزپور و همکاران، ۱۴۰۲، Galitskaya et al. 2021;Asemoloye et al. 2020; Salmazo et al. 2023).

پیشینه پژوهش

بر اساس نتایج حاصل از بررسی پیشینه‌های پژوهشی می‌توان بیان نمود که ریزموجودات خاک‌زی قادر به مدیریت منابع آب، خاک و حفظ عملکرد بوم‌سازگان می‌باشند. در این راستا، Zhao and Xu (2013) با اندازه‌گیری رواناب سطحی از طریق شبیه‌سازی باران[۱] در شدت‌های مختلف روی کرت‌های ۰/۴ مترمربعی در دامنه‌های با و بدون پوسته‌زیستی و پوشش‌گیاهی به این نتایج دست یافتند که پوشش‌گیاهی و پوشش‌گیاهی به‌همراه پوسته‌های‌زیستی خاک، تولید رواناب را به‌ترتیب ۸/۴ و ۱۱/۳ درصد افزایش و میزان هدررفت خاک را تا ۹۲ درصد کاهش دادند. Canton et al. (2020) به‌دنبال تأثیرگذاری سیانوباکتری‌ها در میزان نفوذ آب و تولید رواناب در شرایط باران طبیعی و شبیه‌سازی‌شده، نشان دادند که مقدار کربن آلی خاک، نیتروژن کل، ظرفیت نگه‌داری آب در دسترس و مقدار نفوذ آب افزایش‌یافته و درنتیجه میزان رواناب کم‌تری تولیدشده است. قره‌محمودلی و همکاران (۱۳۹۹) اثر تلقیح سیانوباکتری‌ها بر تغییرپذیری مؤلفه‌های رواناب در اراضی دیم رهاشده و حساس به فرسایش طی چرخه انجماد-ذوب را مورد بررسی قراردادند. نتایج ایشان نشان داد که بر اثر تلقیح تیمارهای سیانوباکتری در مقایسه با تیمار شاهد، زمان شروع رواناب و زمان تا اوج به ترتیب ۲۲۸ و ۴۹ درصد افزایش و مقدار حجم رواناب، مقدار اوج و ضریب رواناب ۶۵، ۴۸ و ۶۵ درصد کاهش داشته است. Fall et al. (2022) تأثیر قارچ‌های خاک‌زی بر ترکیب، تنوع و فعالیت جوامع میکروبی در خاک و هم‌چنین بهبود حاصلخیزی خاک از طریق ترسیب کربن خاک، محتوای مواد مغذی، فعالیت‌های میکروبی و ساختار خاک را تأیید کردند. Jafarpoor et al. (2022a) در بررسی نقش تلقیح سیانوباکتری‌ها بر ویژگی‌های رواناب (زمان شروع رواناب، زمان تا اوج و مقدار حجم رواناب) تحت شرایط شبیه‌سازی باران به این نتیجه رسیدند که سیانوباکتری‌ها با ترشح اگزوپلی‌ساکاریدها[۲] نه‌تنها تولید رواناب را به تعویق انداختند، بلکه به‌طور مؤثری ویژگی‌های رواناب را مهار و سبب افزایش نفوذ و ذخیره آب در خاک شدند. Sadeghi et al. (2023) به بررسی تلقیح جداگانه باکتری‌ها و ترکیبی باکتری‌ها و سیانوباکتری‌ها استخراج‌شده از خاک مارن در تغییر فرآیندهای فرسایش شیاری تحت شرایط شبیه‌سازی باران پرداختند. تجزیه‌وتحلیل‌های آماری نشان داد که تیمارهای تلقیح شده، تمام مؤلفه‌های رواناب و تلفات خاک، ویژگی‌های هیدرولیکی جریان و ریخت‌شناسی شیار را به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) مهار کردند.

Kheirfam et al. (2017a,b); Rodriguez-Caballero et al. (2013) و Sadeghi et al. (2021b, 2023) نیز علاوه بر بهبود مؤلفه‌های رواناب سطحی، میزان کاهش هدررفت خاک در شرایط تلقیح سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها را گزارش کردند.

جمع‌بندی پیشینه‌های پژوهشی مرتبط نشان می‌دهد که استفاده از ریزموجودات خاک‌زی با هدف اصلی کاهش رواناب سطحی در خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین بررسی تلقیح[۳] ریزموجودات خاک‌زی و تولید رواناب در خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی، ضرورت انجام پژوهش‌های تکمیلی در استفاده از ریزموجودات خاک‌زی را ضروری می‌نماید. در همین راستا ارزیابی عملکرد ریزموجودات خاک‌زی بر مهار پیامدهای آلودگی‌های نفتی با تأکید بر تولید رواناب در خاک آلوده به گازوییل[۴] با تلقیح باکتری‌ها، سیانوباکتری‌ها و قارچ‌های خاک‌زی در شرایط آزمایشگاهی در مقیاس کرت‌های فرسایشی[۵] کوچک و تحت شبیه‌سازی باران در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس مدّنظر قرار گرفت. در این راستا انتظار می‌رود که تلقیح ریزموجودات خاک‌زی در مناطق تحت تأثیر آلودگی‌های نفتی، بتوانند نقش معنی‌داری در بهبود مؤلفه‌های رواناب بازی کنند.

روش‌شناسی پژوهش

خاک مورد استفاده

به‌منظور انجام پژوهش حاضر، اقدام به برداشت خاک از اطراف پالایشگاه نفت تهران و نزدیکی نیروگاه برق شهر ری در جنوب تهران در

---

۱. Rainfall Simulation
۲. Exopolysaccharide
3. Inoculation
۴. Gasoil
5. Experimental Plot

حد واسط طول جغرافیایی "۴۶ ´۲۴ °۵۱ تا "۵۲ ´۲۴ °۵۱ شرقی و عرض جغرافیایی "۲ ´۳۱ °۳۵ تا "۷ ´۳۱ °۳۵ شمالی با ارتفاع ۱۰۱۲ متر از سطح دریا و متوسط بارندگی سالیانه ۲۳۶/۲ میلی‌متر و با شیب متوسط حدود ۲۵ درصد شد. خاک از عمق صفر تا پنج سانتی‌متری سطح خاک منطقه با ۱۳ نمونه خاک از مساحت یک هکتاری به صورت جداگانه برداشت و به آزمایشگاه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس منتقل و تا قبل از انجام آزمایش‌ها در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شد (Barger et al. 2013). سپس نمونه‌های خاک زیر هود کاملاً استریل شده، با هاون کوبیده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند (Chamizo et al. 2012).

کشت، شناسایی و خالص‌سازی سیانوباکتری‌ها، باکتری‌ها و قارچ خاک‌زی

به‌منظور جداسازی، شناسایی و خالص‌سازی ریزموجودات در خاک منطقه مورد بررسی، اقدام به استفاده از محیط کشت‌های عمومی سیانوباکتری‌ها، باکتری‌ها و قارچ‌های خاک‌زی شد. پس از بررسی تعداد گسترده‌ای از محیط کشت‌ها، برای باکتری‌ها محیط‌کشت عمومی TSA[1] و NA[2] (Lutton et al. 2013)، برای سیانوباکتری‌ها محیط‌کشت عمومی BBM [3] و BG11 [4] (Ehlers et al. 2008; Anderson, 2005) و برای قارچ‌های خاک‌زی محیط‌کشت PDA[5] (محسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵ و Chaudhry et al. 2012) به‌دلیل اقتصادی بودن، قابلیت دسترسی و تهیه آسان، میزان توانایی در رشد طیف گسترده‌ای از ریزموجودات خاک‌زی، عملکرد و متداول بودن انتخاب شدند (Anderson, 2005; Sharma et al. 2011). به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌های خاک برای کشت، به میزان ۱۰ گرم از خاک الک شده درون ظروف پتری[6] با سه تکرار به‌صورت جداگانه ریخته و ۱۰ میلی‌لیتر از محیط‌کشت BBM و BG11 و برای قارچ‌های خاک‌زی محیط‌کشت PDA اضافه شد. لامل‌ها به تعداد لازم درون آن‌ها قرار گرفت، سپس ظروف مزبور درون دستگاه رشد[7] با دمای ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد و شدت نور ۵۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه در دوره‌های نوری ۱۰:۱۴ (مدت زمان ساعت روشنایی : تاریکی) قرار داده شد (Vieira and Nahas, 2005). سیانوباکتری‌ها و قارچ‌های خاک‌زی طی بازه زمانی ۳۵ روزه و هر پنج روز یک بار و با استفاده از لام شمارش نئوبار[8] در زیر میکروسکوپ نوری شناسایی و شمارش شدند (Barinova, 2017; ZareiDarki et al. 2017). شناسایی آن‌ها به روش ریخت‌شناسی و با استفاده از میکروسکوپ نوری بر اساس روش‌های استاندارد ارائه‌شده در کلیدهای شناسایی معتبر انجام شد (Komarek and Anagnostidis, 1999; Bergey et al. 1974; Gams et al. 2007; Schrey et al. 2012).

برای کشت باکتری‌ها، بعد از تهیه محیط‌کشت‌های عمومی مربوطه، با یک گرم از نمونه‌های خاک الک شده، اقدام به تهیه سری رقت‌ها[9] با نسبت ۱:۱۰ ($۱۰^{-۱}$ تا $۱۰^{-۱۰}$) با محلول ۸/۵ گرم نمک صنعتی[10] شد (Cappuccino and Sherman, 2007). شناسایی باکتری‌های تشکیل شده در ظروف پتری، از طریق رنگ‌آمیزی گرم[11] و بر اساس مشخصات ریخت‌شناسی و راهنمای باکتری‌شناسی و با استفاده از میکروسکوپ نوری با قدرت تفکیک بالا انجام شد (Garrity et al. 2001). انتخاب سیانوباکتری‌های *Nostoc* sp.، *Microcoleus* sp.، *Lyngbya* sp.، *Phormidium* sp. و *Oscillatoria* sp.، قارچ خاک‌زی *Penicillium oxalicam* و باکتری‌های *Baclilus* و *Azetobacter* بر اساس گستره حضور فراوان در منطقه موردمطالعه، رشد و تکثیر در شرایط نامناسب محیطی، افزایش تثبیت نیتروژن و ترسیب کربن در خاک، توان ترشح موادچسبنده پلی‌ساکاریدی و مناسب برای کیفیت‌بخشی مؤلفه‌های خاک با هدف حفظ منابع آب‌وخاک انجام شد (Ershad, 2009; Chamizo et al. 2018; Cania et al. 2019; Sadeghi et al. 2021b).

پس از فرآیند شناسایی باکتری‌های انتخاب شده، با استفاده از محیط‌کشت‌های اختصاصی NA و Azotobacter Agar به روش سری رقت و بشقاب آگار[12] از بین سایر باکتری‌ها استخراج و خالص‌سازی شد. برای انجام فرآیند تکثیر، باکتری‌ها به‌وسیله لوپ‌های میکروبیولوژی به ارلن‌های حاوی محیط کشت LB[13] و سیانوباکتری‌ها به محیط کشت BBM منتقل (Sadeghi et al. 2017b)

---

1. Tryptic Soy Agar
2. Nutrient Agar
3. Bold Basal Medium
4. Blue Green 11
5. Potato Dextrose Agar
6. Petri Dish
7. Germinator
8. Neubauer-chamber-cell-counting
9. Serial Dilution Technique
10. NaCl
11. Gram
12. Plate Agar
13. Luria Broth

(Garbeva et al. 2011; Kheirfam et al. 2017a) و مرتباً تا رسیدن به تعداد 10^{12} عدد سلول در واحد لیتر و قابلیت انتقال به کرت‌ها شمارش شدند (Kheirfam et al. 2017b)، حجم دو لیتر از قارچ موردنظر با تعداد سلول 10^{8} عدد سلول در هر لیتر از محیط‌کشت PDA، از مرکز تحقیقات خاک‌وآب کرج تهیه شد. در نهایت در حجم مناسب با تعداد سلول‌های لازم و حدود دو لیتر از هر تیمار برای تلقیح بر سطح کرت‌های آزمایشی تهیه شدند.

آماده‌سازی کرت‌های آزمایشی

برای انجام پژوهش مورد نظر از سامانه شبیه‌ساز باران با تعداد ۲۴ کرت فرسایشی نیم در نیم متری و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و شیب حدود ۲۵ درصد در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشکده منابع‌طبیعی دانشگاه تربیت مدرس استفاده و آماده‌سازی آن‌ها بر اساس روش‌های استاندارد و در تطابق حداکثری با شرایط طبیعی استفاده شد (Sadeghi et al. 2017b). به این منظور پس از هوا خشک‌کردن خاک ترکیبی از منطقه مطالعاتی تا حد رطوبت بهینه و حذف بقایای گیاهی، سنگ و سنگ‌ریزه، نمونه‌های خاک از الک‌های هشت و چهار میلی‌متری عبور داده و برای پرکردن بخش بالایی کرت‌های آزمایشی استفاده شد. عمق ۲۰ تا ۲۵ سانتی‌متر کرت‌ها از پوکه معدنی پر و خاک به ضخامت حدود ۱۰ سانتی‌متر در بخش بالایی کرت‌ها قرار داده شد و کوبیدگی لازم توسط یک تخته چوبی تا رسیدن به جرم مخصوص ظاهری منطقه انجام شد (Khaledi Darvishan et al. 2014; Kheirfam et al. 2017b). پس از این مرحله به‌منظور تأمین شرایط رطوبت پیشین خاک و متناسب با شرایط طبیعی، حدود ۲۴ ساعت تحت شرایط اشباع قرار گرفت و سپس به‌مدت ۲۴ ساعت دیگر رها شد تا به‌حالت شرایط رطوبتی متناسب با قابلیت نگه‌داری طبیعی خاک برسد (Sadeghi et al. 2017b).

در ادامه، با توجه به اینکه تعداد کل کرت‌های آزمایشی در مجموع ۲۴ عدد (یک تیمارشاهد و ۷ تیمار تلقیح شده باکتری، سیانوباکتری، قارچ، باکتری+قارچ، سیانوباکتری+قارچ، باکتری+سیانوباکتری و باکتری+سیانوباکتری+قارچ در سه تکرار) و با توجه به میزان مبنای ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گازوییل و جرم مخصوص آن، مقدار ۷۲۰ میلی‌لیتر گازوییل به‌صورت یکنواخت و در بازه‌های زمانی یکسان بر سطح خاک پاشیده شد (Mohammadi et al. 2018). کرت‌ها به مدت‌زمان یک ماه در شرایط طبیعی قرار داده شد.

تلقیح ریزموجودات خاک‌زی و شبیه‌سازی باران

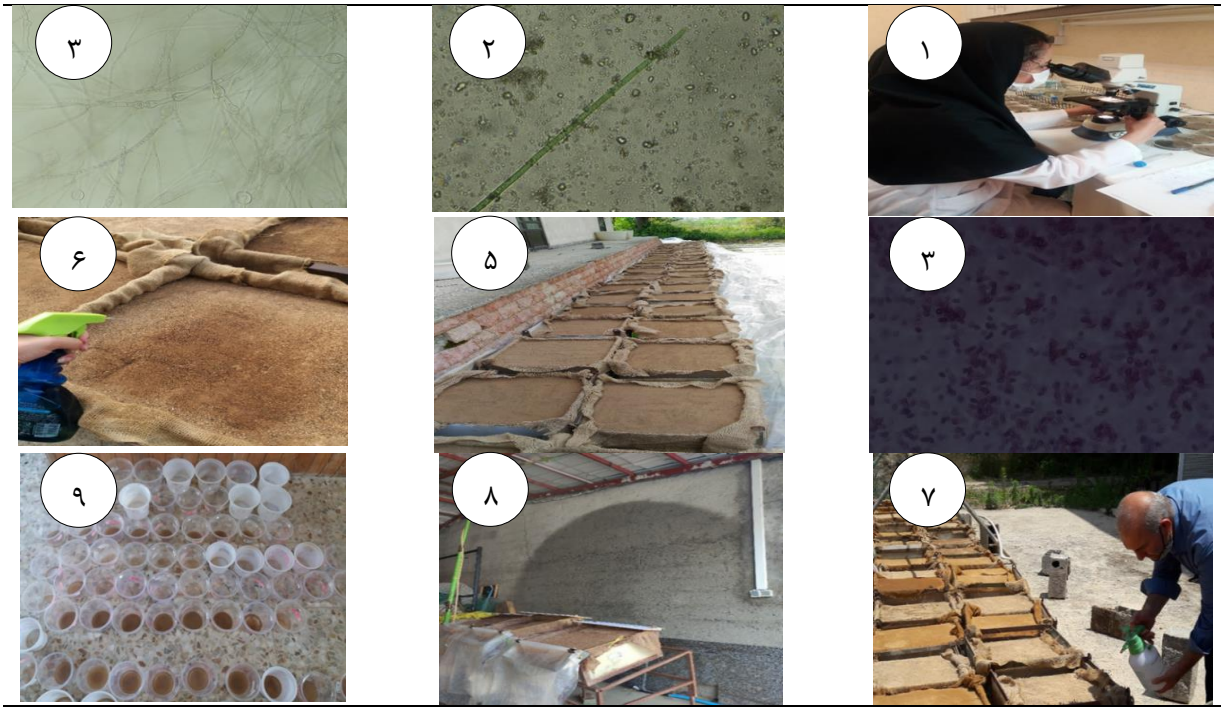
در نهایت پس از آماده‌سازی کرت‌ها، مایه تلقیحی با حجم نیم لیتر به ازای هر مترمربع از کرت آزمایشی، ترکیب دوبه‌دویی، ترکیب سه‌تایی و جداگانه باکتری، سیانوباکتری و قارچ خاک‌زی آماده و بر سطح خاک به‌صورت یکنواخت پاشیده شد و در شرایط هوای آزاد و به دور از بارندگی نگه داشته شدند (Kheirfam et al. 2017a; Tiwari et al. 2019). سپس بعد از ۴۵ روز، تحت شبیه‌سازی باران و با شدت حدود ۳۵ میلی‌متر برساعت و با تداوم ۳۰ دقیقه مبتنی بر نتایج حاصل از تحلیل منحنی‌های شدت مدت فراوانی[1] وقایع بارندگی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک تهران به‌عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به منطقه مورد مطالعه قرار گرفتند (Mohammadi et al. 2018; Sadeghi et al. 2013). حجم رواناب و مؤلفه‌های آن درگام‌های زمانی دو دقیقه‌ای با استفاده از استوانه مدرج اندازه‌گیری و در بانک اطلاعات تیمارهای آزمایش ثبت شدند (Jafarpoor et al. 2022a). نمایی ازمراحل مختلف کار در پژوهش حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است.

تجزیه و تحلیل آماری

در نهایت پس از اجرای آزمایش‌ها، در محیط نرم‌افزارSPSS23، به‌منظورانجام مقایسه‌های آماری، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk و به سبب ارجحیت نسبت به سایر آزمون‌های تعیین نرمال بودن داده‌ها به‌ویژه برای داده‌های با تعداد کم مدنظر قرار گرفت (Shapiro and Wilk, 1965; Razali and Wah, 2011). همگنی واریانس‌ها[2] با آزمون Levene به‌سبب کم‌ترین میزان حساسیت به نرمال بودن داده‌ها و مناسب‌ترین آزمون برای داده‌های کم بررسی شد (Gupta et al. 2019). سپس تجزیه واریانس یک طرفه[3] برای بررسی اثرات یک جانبه و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون Duncan مورد استفاده قرار گرفت (Arnaez et al. 2007).

---

1. Frequency Duration Intensity
2. Homogeneity of Variance
3. One-way ANOVA



شکل ۱. مراحل انجام پژوهش در آزمایشگاه: شناسایی سیانوباکتری‌ها، باکتری‌ها و قارچ خاک‌زی (۴، ۳، ۲ و ۱)، آماده‌سازی کرت‌های فرسایشی (۵)، پاشیدن گازوییل بر سطح خاک (۶)، تلقیح باکتری‌ها، سیانوباکتری‌ها و قارچ خاک‌زی بر سطح خاک (۷)، انجام فرآیند شبیه‌ساز باران (۸)، اندازه‌گیری رواناب (۹) (منبع: یافته‌های تحقیق)

یافته‌های پژوهش

با توجه به نتایج به‌دست آمده از نمونه‌برداری آزمایش‌ها، جدول ۱ مقادیر مشاهداتی زمان شروع رواناب و تحلیل‌های آماری در تیمارهای پژوهش را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، متوسط زمان شروع رواناب در تیمار شاهد، باکتری، سیانوباکتری، قارچ، باکتری+قارچ، سیانوباکتری+قارچ، باکتری+سیانوباکتری و باکتری+سیانوباکتری+قارچ به‌ترتیب ۱۲/۵۹، ۱۸/۵۲، ۱۲/۵۸، ۱۱/۲۴، ۹/۴۶، ۱۸/۸۷، ۱۴/۴۶ و ۱۶/۱۰ دقیقه به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از نمونه‌برداری حجم رواناب در گام‌های زمانی تعیین شده طی بارش حدود ۳۵۰۰ لیتر باران شبیه‌سازی شده، جدول‌های ۲ و ۳ تغییرات زمانی حجم رواناب و متوسط حجم کل رواناب اندازه‌گیری شده پس از اتمام باران شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. متوسط حجم کل رواناب اندازه‌گیری شده در تیمار شاهد، باکتری، سیانوباکتری، قارچ، باکتری+قارچ، سیانوباکتری+قارچ، باکتری+سیانوباکتری و باکتری+سیانوباکتری+قارچ به‌ترتیب ۱۷۶/۹۰، ۱۸۵/۰۰، ۸۱/۳۰، ۶۱/۵۷، ۳۰۴/۶۳، ۲۷/۳۷، ۱۰۳/۷۳ و ۲۴۷/۹۳ میلی‌لیتر محاسبه شد.

جدول۱. زمان شروع رواناب (دقیقه) در کرت‌های شاهد و تلقیح شده با ریزموجودات خاک‌زی

تیمار	تکرار			میانگین (دقیقه)	انحراف معیار (دقیقه)	ضریب تغییرات (درصد)
	۱	۲	۳			
شاهد	۸/۱۹	۱۴/۰۴	۱۵/۵۵	۱۲/۵۹	۳/۸۹	۳۰/۸۷
باکتری	۱۹/۲۳	۲۰/۳۲	۱۶/۰۲	۱۸/۵۲	۲/۲۴	۱۲/۰۷
سیانوباکتری	۱۱/۱۱	۸/۲۳	۱۸/۴	۱۲/۵۸	۵/۲۴	۴۱/۶۷
قارچ	۱۱/۱۷	۱۳/۲۲	۹/۳۲	۱۱/۲۴	۱/۹۵	۱۷/۳۶
باکتری+قارچ	۱۴/۰۲	۷/۰۵	۷/۳۲	۹/۴۶	۳/۹۵	۴۱/۷۲
سیانوباکتری+قارچ	۲۰/۱۵	۱۶/۲۴	۲۰/۲۱	۱۸/۸۷	۲/۲۷	۱۲/۰۶
باکتری+سیانوباکتری	۱۵/۱۹	۱۳/۱۷	۱۵/۰۲	۱۴/۴۶	۱/۱۲	۷/۷۵
باکتری+سیانوباکتری+قارچ	۱۷/۰۳	۱۹/۰۱	۱۲/۲۶	۱۶/۱۰	۳/۴۷	۲۱/۵۵

جدول ۲. تغییرات زمانی حجم رواناب (میلی‌لیتر) پس از شروع رواناب در کرت‌های شاهد و تلقیح شده با ریزموجودات خاک‌زی

تیمار	تکرار	زمان (دقیقه) ۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۲ دقیقه پس از بارش	میانگین (میلی‌لیتر)	انحراف معیار (میلی‌لیتر)	ضریب تغییرات (درصد)
شاهد	۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۲/۰۰	۱/۸۰	۲/۲۰	۲/۶۰	۳/۴۰	۸/۲۰	۹/۰۰	۲۳/۰۰	۴۰/۰۰	۳۷/۰۰	۱۷/۵۰	۱۱/۸۴	۱۴/۶۲	۱۲۳/۴۹
	۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۵۰	۲/۰۰	۲/۲۰	۱۴/۱۰	۳۴/۰۰	۴۴/۰۰	۴۹/۰۰	۱۲/۵۰	۱۸/۴۸	۲۰/۶۱	۱۱۱/۵۵
	۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۰۰	۵/۲۰	۱۷/۵۰	۲۷/۰۰	۲۸/۰۰	۵۳/۰۰	۵۴/۰۰	۶۵/۰۰	۶/۵۰	۳۱/۵۹	۲۳/۳۷	۷۳/۹۹
باکتری	۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۸/۰۰	۲۳/۰۰	۴۸/۰۰	۴۹/۰۰	۵۶/۰۰	۵۷/۰۰	۶۹/۰۰	۵/۰۰	۴۵/۷۱	۱۸/۶۰	۴۰/۶۸
	۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۱۰	۵/۹۰	۱۷/۰۰	۱۷/۵۰	۱۳/۵۰	۴/۰۰	۱۱/۰۰	۷/۲۲	۶۵/۶۴
	۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۲/۰۰	۸/۰۰	۳۰/۰۰	۵۶/۰۰	۴۰/۰۰	۴۳/۰۰	۳/۰۰	۲۵/۷۱	۲۲/۰۸	۸۵/۸۷
سیانوباکتری	۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۷۰	۱/۰۰	۱/۶۰	۲/۱۰	۳/۵۰	۴/۴۰	۱۱/۰۰	۱۶/۰۰	۲۵/۵۰	۰/۰۰	۶/۶۱	۸/۳۷	۱۲۶/۶۲
	۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۰	۰/۷۰	۱/۰۰	۱/۲۰	۱/۴۰	۲/۱۰	۷/۰۰	۱۹/۰۰	۱۸/۰۰	۳۹/۰۰	۳۱/۰۰	۲/۱۰	۱۰/۹۸	۱۳/۷۸	۱۲۵/۴۸
	۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۵۰	۶/۰۰	۱۰/۵۰	۱۶/۵۰	۱۹/۰۰	۴/۵۰	۰/۰۰	۹/۸۳	۶/۷۲	۶۸/۳۵
قارچ	۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۶۰	۱/۸۰	۱/۸۰	۲/۰۰	۱/۸۰	۷/۶۰	۲/۲۰	۱/۸۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۳۶	۱/۸۹	۸۰/۱۸
	۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۶۰	۲/۷۰	۳/۵۰	۴/۰۰	۴/۴۰	۱۴/۰۰	۲۳/۰۰	۲۷/۰۰	۳۰/۰۰	۷/۰۰	۱۲/۲۴	۱۱/۵۲	۹۴/۱۰
	۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۵۰	۲/۴۰	۲/۶۰	۳/۹۰	۵/۵۰	۶/۰۰	۴/۲۰	۳/۴۰	۳/۲۰	۹/۲۰	۹/۰۰	۵/۰۰	۴/۶۳	۲/۵۶	۵۵/۴۳
باکتری+قارچ	۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۵/۰۰	۸/۰۰	۱۰/۰۰	۱۸/۵۰	۲۱/۰۰	۱۹/۰۰	۲۲/۰۰	۳۴/۰۰	۱۰/۰۰	۱۷/۱۹	۹/۳۳	۵۴/۳۱
	۲	۸/۱۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۳۳/۰۰	۳۵/۰۰	۶۹/۰۰	۷۲/۰۰	۶۷/۰۰	۶۳/۰۰	۳۳/۰۰	۳۲/۰۰	۳۱/۰۰	۴۳/۰۰	۳۸/۰۰	۶/۹۰	۴۳/۶۸	۱۹/۶۸	۴۵/۰۶
	۳	۱/۳۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۴/۸۰	۳/۶۰	۱/۸۰	۲/۶۰	۸/۰۰	۷/۲۰	۲۳/۰۰	۳۱/۰۰	۴۱/۰۰	۶۳/۰۰	۶۵/۰۰	۳/۰۰	۲۱/۰۳	۲۳/۷۹	۱۱۳/۱۴
سیانوباکتری+قارچ	۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۰	۲/۲۰	۱۳/۰۰	۱۶/۵۰	۱۱/۰۰	۳/۶۰	۸/۷۲	۶/۸۵	۷۸/۵۶
	۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۶۰	۱/۸۰	۲/۴۰	۲/۹۰	۵/۲۰	۳/۶۰	۷/۸۰	۲/۶۰	۳/۴۷	۲/۳۹	۶۸/۸۳
	۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۰	۱/۸۰	۲/۶۰	۱/۶۰	۷/۸۰	۱/۸۰	۲/۸۴	۲/۸۸	۱۰۱/۴۹
باکتری+ سیانوباکتری	۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۰۰	۰/۶۰	۳/۲۰	۲/۸۰	۲/۸۰	۸/۲۰	۱۸/۰۰	۲۴/۵۰	۴/۴۰	۷/۷۶	۸/۷۸	۱۱۳/۱۲
	۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۰۰	۱۳/۰۰	۲۵/۰۰	۳۰/۰۰	۳۹/۰۰	۱/۴۰	۲۱/۸۰	۱۴/۵۲	۶۶/۵۸
	۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۴۰	۱/۵۰	۱/۷۰	۲۰/۰۰	۲۲/۵۰	۱۷/۰۰	۲۸/۰۰	۴۸/۰۰	۱/۰۰	۱۷/۵۱	۱۶/۲۰	۹۲/۵۰
باکتری+ سیانوباکتری+ قارچ	۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۹۰	۲/۶۰	۳/۲۰	۶/۰۰	۸/۵۰	۷/۱۰	۱۸/۵۰	۳/۰۰	۶/۹۷	۵/۵۷	۷۹/۸۹
	۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۴۰	۷/۱۰	۱۷/۰۰	۲۰/۵۰	۲۶/۰۰	۳۵/۰۰	۲۰/۰۰	۱۷/۸۳	۱۲/۲۸	۶۸/۸۸
	۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۷/۰۰	۲۸/۰۰	۳۵/۰۰	۵۵/۰۰	۵۸/۰۰	۹۰/۰۰	۱۰۵/۰۰	۱۳۰/۰۰	۷۰/۰۰	۱۳/۰۰	۶۵/۳۳	۳۷/۴۱	۵۷/۲۶

جدول ۳. حجم کل رواناب (میلی‌لیتر) در کرت‌های شاهد و دارای ریزموجودات خاک‌زی

تیمار	تکرار ۱	۲	۳	میانگین (دقیقه)	انحراف معیار (دقیقه)	ضریب تغییرات (درصد)
شاهد	۱۳۰/۲۰	۱۴۷/۸۰	۲۵۲/۷۰	۱۷۶/۹۰	۶۶/۲۳	۳۷/۴۴
باکتری	۳۲۰/۰۰	۵۵/۰۰	۱۸۰/۰۰	۱۸۵/۰۰	۱۳۲/۵۷	۷۱/۶۶
سیانوباکتری	۶۴/۱۰	۱۲۰/۸۰	۵۹/۰۰	۸۱/۳۰	۳۴/۳۰	۴۲/۱۹
قارچ	۲۳/۶۰	۱۱۰/۲۰	۵۰/۹۰	۶۱/۵۷	۴۴/۲۷	۷۱/۹۱
باکتری+قارچ	۱۳۷/۵۰	۵۲۴/۱۰	۲۵۲/۳۰	۳۰۴/۶۳	۱۹۸/۵۴	۶۵/۱۷
سیانوباکتری+قارچ	۴۳/۶۰	۲۴/۳۰	۱۴/۲۰	۲۷/۳۷	۱۴/۹۴	۵۴/۵۸
باکتری+سیانوباکتری	۶۲/۱۰	۱۰۹/۰۰	۱۴۰/۱۰	۱۰۳/۷۳	۳۹/۲۷	۳۷/۸۵
باکتری+سیانوباکتری+قارچ	۴۸/۸۰	۱۰۷/۰۰	۵۸۸/۰۰	۲۴۷/۹۳	۲۹۵/۹۴	۱۱۹/۳۶

جدول ۴. ضریب رواناب کل (درصد) در کرت‌های شاهد و دارای ریزموجودات خاک‌زی

تیمار	تکرار			میانگین (دقیقه)	انحراف معیار (دقیقه)	ضریب تغییرات (درصد)
	۱	۲	۳			
شاهد	۳/۷۲	۴/۲۲	۷/۲۲	۵/۰۵	۱/۸۹	۳۷/۴۴
باکتری	۹/۱۴	۱/۵۷	۵/۱۴	۵/۲۹	۳/۷۹	۷۱/۶۶
سیانوباکتری	۱/۸۳	۳/۴۵	۱/۶۹	۲/۳۲	۰/۹۸	۴۲/۱۹
قارچ	۰/۶۷	۳/۱۵	۱/۴۵	۱/۷۶	۱/۲۶	۷۱/۹۱
باکتری+قارچ	۳/۹۳	۱۴/۹۷	۷/۲۱	۸/۷۰	۵/۶۷	۶۵/۱۷
سیانوباکتری+قارچ	۱/۲۵	۰/۶۹	۰/۴۱	۰/۷۸	۰/۴۳	۵۴/۵۸
باکتری+سیانوباکتری	۱/۷۷	۳/۱۱	۴/۰۰	۲/۹۶	۱/۱۲	۳۷/۸۵
باکتری+سیانوباکتری+قارچ	۱/۳۹	۳/۰۶	۱۶/۸۰	۷/۰۸	۸/۴۶	۱۱۹/۳۶

پس از نمونه‌برداری رواناب در گام‌های زمانی تعیین شده طی واقعه بارش، ضریب رواناب در پایه زمانی دو دقیقه در هر یک از تیمارها به‌دست آمد. جدول ۴ ضریب رواناب کل در تیمارهای پژوهش را نشان می‌دهد. ضریب رواناب کل با توجه به بارش کل ورودی در زمان آزمایش در تیمار شاهد، تیمار باکتری، سیانوباکتری، قارچ، باکتری+قارچ، سیانوباکتری+قارچ، باکتری+سیانوباکتری و باکتری+سیانوباکتری+قارچ به‌ترتیب ۵/۰۵، ۵/۲۹، ۲/۳۲، ۱/۷۶، ۸/۷۰، ۰/۷۸، ۲/۹۶ و۷/۰۸ درصد به‌دست آمد.

بحث

تحلیل نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تلقیح ریزموجودات خاک‌زی بر زمان شروع رواناب، دارای اختلاف معنی‌داری است ($P<0/05$)، به‌گونه‌ای که تیمار باکتری، سیانوباکتری+قارچ، باکتری+سیانوباکتری و باکتری+سیانوباکتری+قارچ به‌ترتیب ۴۷/۱۰، ۴۹/۸۸، ۱۴/۸۵و ۲۷/۸۸ درصد زمان شروع رواناب را نسبت به تیمار شاهد افزایش و تیمارهای سیانوباکتری، قارچ، باکتری+قارچ به‌ترتیب ۰/۰۸، ۱۰/۷۲ و ۲۴/۸۶ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داده است. قابلیت جذب بیشینه آب توسط دیواره سلولی و ترشحات پلی‌ساکاریدی[1] باکتری‌ها در کنارکانال‌های متخلخل ایجاد شده حاصل از اتصال ذرات خاک از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی، باعث افزایش زمان شروع رواناب شدند که با نتایج خیرفام و همکاران (۲۰۱۸)، Belnap et al. (2013) و Deng et al. (2015) مطابقت دارد. هم‌چنین سیانوباکتری در ترکیب دوبه دویی با باکتری و با قارچ خاک‌زی عملکرد بهتری نسبت به تلقیح جداگانه داشته است. مقایسه میانگین زمان شروع رواناب حاکی از آن بود که در تیمار تلقیحی سیانوباکتری+قارچ، رواناب پس از بارندگی، ۶/۲۸ دقیقه نسبت به تیمار شاهد دیرتر شروع شده که نشان از مناسب‌ترین عملکرد بین تیمارها در تأخیر در شروع رواناب است که اثر هم‌افزایی سیانوباکتری‌ها و قارچ خاک‌زی قابل مشاهده است. سیانوباکتری‌های خاک‌زی تمایل زیادی به چسبیدن به اطراف خاکدانه‌ها از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی خود داشته و هم‌چنین با تأمین منابع غذایی برای سایر ریزموجودات خاک‌زی از جمله قارچ خاک‌زی باعث افزایش عملکرد قارچ خاک‌زی و نیز شرایط افزایش تخلخل در مدت طولانی‌تری را مهیا می‌نماید (Rossi et al. 2017; Cania et al. 2019; Kheirfam, 2020). قارچ‌ها با تولید سریع نخینه[2] می‌توانند در بافت خاک رشد کرده و گسترش یابند و با افزایش سطح دسترسی زیستی به آب و مواد غذایی شرایط برای رشد و فعالیت فراهم می‌شود.

اگر چه طبق جدول ۵ نتایج حاکی از عدم وجود اختلاف معنی‌دار در حجم و ضریب رواناب است، با این‌حال حجم رواناب سطحی در تیمار سیانوباکتری، قارچ، سیانوباکتری+قارچ و باکتری+سیانوباکتری به‌ترتیب ۵۴/۰۴، ۶۵/۱۹ ، ۸۴/۵۳ و ۴۱/۳۶ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش و تیمارهای باکتری، باکتری+قارچ و باکتری+سیانوباکتری+قارچ به‌ترتیب ۴/۵۸درصد، ۷۲/۲۰ درصد و ۴۰/۱۵ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافته است. دلیل عدم اختلاف معنی‌دار را بعضاً می‌توان به واریانس زیاد داده‌ها نسبت داد. در همین راستا ضریب رواناب در تیمار سیانوباکتری، قارچ، سیانوباکتری+قارچ و باکتری+سیانوباکتری به‌ترتیب ۵۴/۰۶، ۶۵/۱۵، ۸۴/۵۵ و ۴۱/۳۹ درصد نسبت به تیمار شاهد

1. Polysaccharide
2. Mycelium

کاهش و تیمارهای باکتری، باکتری+قارچ و باکتری+سیانوباکتری+قارچ به‌ترتیب ۴/۷۵، ۷۲/۲۸ و ۴۰/۲۰ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافته است. افزایش حجم رواناب و ضریب رواناب در تیمار باکتری و باکتری+سیانوباکتری+قارچ، به‌دلیل انحراف معیار بین داده‌ها در تکرارهای مختلف است. تیمار باکتری+قارچ بیش‌ترین اثر منفی بر مؤلفه‌های رواناب داشته است. باکتری و قارچ خاک‌زی هر دو از ریزموجودات دگرتغذیه هستند، بنابراین رقابت بین آن‌ها در استفاده از مواد مغذی برای رشد و فعالیت وجود دارد. از طرفی با توجه به مقادیر مذکور حجم رواناب خروجی و ضریب رواناب در تیمار سیانوباکتری+قارچ، بیش‌ترین میزان کاهش نسبت به سایر تیمارهای ریزموجودات خاک‌زی را داشته است. اگزوپلی‌ساکاریدهای ناشی از سیانوباکتری‌ها با خاصیت چسبندگی و ژله‌ای، لایه‌های لزج در اطراف سلول‌ها تشکیل می‌دهند که باعث اتصال ذرات خاک به یکدیگر و هم‌چنین جذب و نگه‌داری آب در خاک شده و بر کاهش زمان شروع، حجم و ضریب رواناب تأثیر داشته که مورد تأیید Sadeghi et al. (2020) Gharemahmudli et al. (2020) و Jafarpoor et al. (2022a) نیز است. Chamizo et al. (2018) معتقدند که سیانوباکتری‌ها با انجام عمل فتوسنتز و تولید مواد مغذی، باعث افزایش عملکرد دیگر ریزموجودات از جمله قارچ خاک‌زی در بهبود مؤلفه‌های کمی و کیفی خاک می‌شوند. از طرفی دیواره سلولی سیانوباکتری‌ها با قابلیت ارتجاعی بودن، توانایی بالایی در جذب و ذخیره آب دارند (Rossi et al. 2018; Roman et al. 2021). Ritz and Young (2004) بیان کردند که قارچ‌ها با ترشحات پلی‌ساکارید و گلیکوپروتئین که یک فضای محافظ و روان‌کننده در اطراف هیف‌ها تشکیل می‌دهند، دارای خاصیت چسبندگی هستند که به چسبیدن اجزای خاک به یکدیگر کمک می‌کند و با ایجاد لوله‌های بسیار باریک توسط نخینه‌های قارچ و ایجاد شبکه‌های متراکم، باعث نفوذ آب و نگه‌داشت آب در خاک می‌شوند (Sileshi and Mafongoya, 2006; Davidson and Grieve, 2006). هم‌چنین نتایج پژوهش حاضر با نتایج Sadeghi et al. (2017, 2020, 2023)، Jafarpoor et al. (2022a) و Jafarpoor et al. (2022a) مبنی بر تأثیر ریزموجودات بر مهار مؤلفه‌های رواناب هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

حفاظت از سطح خاک در برابر نیروهای فرساینده باران و رواناب از راه‌کارهای مدیریت حوزه‌های آبخیز است. اثرگذاری سازگار با بوم‌سازگان از جمله اهداف موردنظر در اجرای اقدامات مدیریتی نرم برای حفاظت خاک و آب می‌باشد. یافته‌های این پژوهش بیانگر تأثیر تلقیح سیانوباکتری‌ها، باکتری‌ها و قارچ‌های خاک‌زی بر مهار رواناب بود. نتایج پژوهش نشان داد که افزایش تخلخل سطح خاک در اثر اتصال ذرات ریز خاک، خاصیت چسبناکی، تورم پذیری و محافظتی ترشحات پلی‌ساکاریدی، افزایش نفوذ آب و نگه‌داشت آب را می‌توان از عوامل اصلی بهبود مؤلفه‌های رواناب سطحی دانست. ریزموجودات خاک‌زی حتی در خاک‌های آلوده به مواد نفتی، از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی و اگزوپلی‌ساکاریدی با چسبیدن به اطراف ذرّات ریز خاک و اتصال آن‌ها به هم باعث افزایش تخلخل سطح خاک شده و با جذب سلولی آب و ایجاد ریزکانال‌ها باعث افزایش نفوذپذیری خاک و در نهایت کاهش حجم رواناب شده است. ضمن تأیید عملکرد ریزموجودات خاک‌زی منطقه موردمطالعه بر مؤلفه‌های مؤثر در تولید رواناب در خاک‌های آلوده به گازوییل، می‌توان بیان کرد تیمار ترکیبی سیانوباکتری+قارچ بهترین عملکرد را در مهار مؤلفه‌های موردمطالعه داشته است. با این حال تلقیح ریزموجودات خاک‌زی در خاک آلوده به مواد نفتی ابزاری زیستی و مؤثر بوده و امکان کاربرد آن در شرایط محیطی مختلف با اهداف حفاظت از منابع خاک و آب وجود دارد. در همین راستا ارزیابی عملی رویکرد موفق مستندشده در این پژوهش در مقیاس اجرایی و وسیع با حمایت بخش‌های اجرایی متولی و از جمله سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور پیشنهاد می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

خیرفام، حسین؛ همایی، مهدی؛ صادقی، سیدحمیدرضا و زارعی‌دارکی، بهروز (۱۳۹۶). نقش غنی‌سازی پوسته زیستی خاک از طریق تلقیح و تحریک باکتری‌ها در افزایش نیتروژن خاک حساس به فرسایش. آب و خاک، ۳۱(۲)، ۵۵۶-۵۴۵. doi: 10.22067/jsw.v31i2.54598

خیرفام، حسین؛ صادقی، سیدحمیدرضا؛ زارعی‌دارکی، بهروز و همایی، مهدی (۱۳۹۷). کاهش هدررفت خاک و آب از طریق تحریک باکتری‌های خاک‌زی در مقیاس کرت‌های کوچک آزمایشگاهی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۴(۲۵)، ۲۵۷-۲۴۳. doi: 10.22069/jwsc.2018.14361.2910

دریایی، راضیه؛ موسوی، سیدعلی‌اکبر؛ قاسمی، رضا و ریاضی، مسعود (۱۴۰۰). اثر مواد نفتی بر مقاومت خاک‌های آهکی. تحقیقات آب و خاک ایران،

۵۲(۱۰)، ۲۶۰۷-۲۶۲۱. doi: 10.22059/ijswr.2021.329800.669061

صادقی، سیدحمیدرضا؛ خیرفام، حسین؛ همایی، مهدی و زارعی‌دارکی، بهروز (۱۳۹۵). بهبودپذیری نفوذ آب در یک خاک حساس به فرسایش در شرایط آزمایشگاهی از طریق افزایش مصنوعی جمعیّت ریزموجودات خاک‌زی. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۷(۴)، ۸۰۵-۷۹۷. doi: 10.22059/ijswr.2016.59986

صادقی، سیدحمیدرضا؛ جعفرپور، عاطفه؛ ذبیحی‌سیلابی، مصطفی؛ ملاشاهی، شکوفه؛ نقدی، مریم؛ شریفی‌مغانی، محمود؛ قیصوری، زینب و فرزادفر، الناز (۱۴۰۰). الگوی مدیریت‌زیستی فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز (مطالعه کاربردی: گلازچای اشنویه، آذربایجان‌غربی). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۴)، ۱۰۱۰-۹۹۷. doi: 10.22059/ijswr.2021.317114.668871

قره‌محمودلی، سودابه؛ نجفی نژاد، علی؛ صادقی، سیدحمیدرضا؛ زارعی دارکی، بهروز؛ محمدیان بهبهانی، علی و خیرفام، حسین (۱۳۹۹). کاهش رواناب سطحی خاک‌های متأثر از چرخه انجماد-ذوب با استفاده از سیانوباکتری‌های خاک‌زی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۷(۳)،-۱۶۳ ۱۸۰. doi: 10.22069/jwsc.2020.17693.3318

محسن زاده، فریبا؛ ظفری، دوستمراد و نوری‌صفا، بهاره (۱۳۹۵). سازش پذیری برخی از گونه‌های قارچ تریکودرما (Trichoderma) به آلودگی نفتی .پژوهش‌های سلولی و مولکولی (مجله زیست شناسی ایران)، ۲۹(۳)، ۳۳۰-۳۲۱.

محمدی، سیما؛ همایی، مهدی و صادقی، سیدحمیدرضا (۱۳۹۴). تولید رواناب در خاک‌های آلوده به نفت سفید و گازوییل. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶(۱): ۱۳۱-۱۲۱. doi: 10.22059/ijswr.2015.54301

نوروزپور، مریم؛ ساریخانی، محمدرضا؛ و علی‌اصغر زاد، ناصر (۱۴۰۲). پایش تغییرات تنفسی خاک لوم‌شنی آلوده به نفتای سنگین در تیمارهای مختلف زیست‌پالایی. دانش آب و خاک، ۳۳(۲)، ۷۲-۵۳. doi: 10.22034/ws.2021.47654.2436

REFERENCES

Adessi, A., Cruz de Carvalho, R., De Philippis, R., Branquinho, C., & Marques da Silva, J. (2018). Microbial extracellular polymeric substances improve water retention in dryland biological soil crusts. *Soil Biology and Biochemistry*, 116, 67-69. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.002.

Ahmadi, M., Abbaspour, M., Ebadi, T., & Maknoon, R. (2021). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of sand-kaolinite mixtures. *Engineering Geology*, 283, 106021. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106021.

Al-Abadi, N. J. A. (2023). The role of the oil industry in environmental pollution-effects and suggested solutions. *Global Ecology and Sustainable Development*, 12, 67-87. https://www.journalzone.org/index.php/bjgesd/article/view/209.

Anderson, R. A. (2005). *Algal Culturing Techniques*. Elsevier Academic Press, London, 496p.

Arnaez, J., Lasanta, T., Ruiz-Flano, P., & Ortigosa, L. (2007). Factors Affecting Runoff and Erosion under Simulated Rainfall in Mediterranean Vineyards. *Soil and Tillage Research*, 93(2), 324-334. https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.013.

Asemoloye, M. D., Tosi, S., Daccò, C., Wang, X., Xu, S., Marchisio, M. A., Gao, W., Jonathan, S. G., & Pecoraro, L. (2020). Hydrocarbon degradation and enzyme activities of *Aspergillus oryzae* and *Mucor irregularis* isolated from nigerian crude oil-polluted sites. *Microorganisms*, 8(12), 1912. https://doi.org/10.3390/microorganisms8121912.

Barger, N. N., Castle, S. C., & Dean, G. N. (2013). Denitrification from nitrogenfixing biologically crusted soils in a cool desert environment, southeast Utah, USA. *Ecological Processes*, 2(1), 1-9. https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-16.

Barger, N.N., Weber, B., Garcia-Pichel, F., Zaady, E., & Belnap, J. (2016). Patterns and controls on nitrogen cycling of biological soil crusts, *In Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*. Springer, Cham, 226, 257-285.

Barinova, S. (2017). How to Align and Unify the Cell Counting of Organisms for Bioindication. *Environmental Sciences and Natural Resources*, 2(2),1-4. https://doi: 10.19080/IJESNR.2017.02.555585

Belnap, J., Prasse, R., & Harper, K. (2001). Influence of biological soil crusts on soil environments and vascular plants, *Biological soil crusts: structure, function and management*, Springer, 281-300.

Belnap, J., Wilcox, B.P., Van Scoyoc, M.W., & Phillips, S.L. (2013). Successional stage of biological soil crusts: an accurate indicator of ecohydrological condition. *Ecohydrology*. 6(3), 474-482. https://doi.org/10.1002/eco.1281.

Bergey, D. H., Buchanan, R. E., & Gibbons, N. E. (1974). Bergeys Manual of Determinative Bacteriology. Williams and Wilkins Company, Baltimor, Maryland, 1246 p.

Bowker, M. A., Reed, S. C., Maestre, F. T., & Eldridge D. J. (2018). Biocrusts: The living skin of the earth.

Plant and Soil, 429, 1-7. https://doi.org/10.1007/s11104-018-3735-1.
Bullard, J. E., Ockelford, A., Strong, C., & Aubault, H. (2018). Effects of cyanobacterial soil crusts on surface roughness and splash erosion. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 3697-3712. https://doi.org/10.1029/2018JG004726.
Cania, B., Vestergaard, G., Kublik, S., Kohne, J. M., Fischer, T., Albert, A., Winkler, B., & Schulz, S. (2020). Biological soil crusts from different soil substrates harbor distinct bacterial groups with the potential to produce exopolysaccharides and lipopolysaccharides. *Microbial ecology*, 79, 326-341. https://doi.org/10.1007/s00248-019-01415-6.
Canton, Y., Chamizo, S., Rodriguez-Caballero, E., Lazaro, R., Roncero-Ramos, B., Roman, J. R., & Sole-Benet, A. (2020). Water Regulation in Cyanobacterial Biocrusts from Drylands: Negative Impacts of Anthropogenic Disturbance. *Water*, 12(3),720: 1-24. https://doi.org/10.3390/w12030720.
Cappuccino, J. G., & Sherman, N. (2007). Microbiology: A Laboratory Manual. Dorling Kindersley Pvt. Ltd, License of Pearson Education, New Delhi, India,143–193.
Chamizo, S., Canton, Y., Miralles, I., & Domingo, F. (2012). Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 49(1), 96-105. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.017.
Chamizo, S., Adessi, A., Certini, G., & De Philippis, R. (2020). Cyanobacteria inoculation as a potential tool for stabilization of burned soils. *Restoration Ecology*, 28, S106-S114. https://doi.org/10.1111/rec.13092.
Chaudhry, S., Luhach, J., Sharma, V., & Sharma, Ch. (2012). Assessment of diesel degrading potential of fungal isolates from sludge contaminated soil of petroleum refinery, Haryana. *Microbiology*, 7(3), 182-190. https://scialert.net/abstract/?doi=jm.2012.182.190.
Chen, Q., He, Y., & Zhang, Z. (2022). Effects of diesel contamination on geotechnical properties of granitic residual soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(17), 1474. https://doi.org/10.1007/s12517-022-10756-5.
Daryaee, R., Moosavi, A.A., ghasemi, R., & Riazi, M. (2021). Effect of Petroleum Products on the Strength of Calcareous Soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(10), 2607-2621. doi: 10.22059/ijswr.2021.329800.669061.(In Persian).
Deng, J., Orner, E.P., Chau, J.F.,Anderson, E.M., Kadilak, A.L.,Rubinstein, R.L., Bouchillon, G.M.,Goodwin, R.A., Gage, D.J., & Shor,L.M. (2015). Synergistic effects of soil microstructure and bacterial EPS on drying rate in emulated soil micromodels. *Soil Biology and Biochemistry*. 83, 116-124. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.12.006.
Devatha, C. P., Vishnu Vishal, A., & Purna Chandra Rao, J. (2019). Investigation of physical and chemical characteristics on soil due to crude oil contamination and its remediation. *Applied Water Science*, 9(4),1-10. https://doi.org/10.1007/s13201-019-0970-4.
Ehlers, K., Bunemann, E. K., Oberson A., Frossard E., Frostegard A., Yuejian M., & Bakken L. R. (2008). Extraction of Soil bacteria from a Ferralsol. *Soil Biology and Biochemistry*,40,1940-1946. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.04.005.
Elinskiy, V. I., Akmedov, R. M., & Ivanova, Y. A. (2020). The problem of environmental pollution in oil production: Topical issue. Vestn. Moscow Univ. Minist. Intern. Aff. Russ,118-122.
Ershad, D. (2009). *Fungi of Iran*. Iranian Research Institute of Plant Protection, Tehran, 531p.
Falciglia, P. P., & Vagliasindi, F. G. A. (2015). Remediation of hydrocarbon polluted soils using2.45 GHz frequency-heating: Influence of operating power and soil texture on soil temperature profiles and contaminant removal kinetics. *Geochemical Exploration*,151,66-73. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.01.007.
Fall, A. F., Nakabonge, G., Ssekandi, J., Founoune-Mboup, H., Apori, S. O., Ndiaye, A., Badji, A., & Ngom, K. (2022). Roles of *Arbuscular mycorrhizal* Fungi on Soil Fertility: Contribution in the Improvement of Physical, Chemical and Biological Properties of the Soil. *Front. Fungal Biology*, 3, 723892. https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.723892.
Ferreira, R.V., Serpa, D., Cerqueira, M.A., & Keizer, J.J. (2016). Short-time phosphorus losses by overland flow in burnt pine and eucalypt plantations in north-central Portugal: A study at micro-plot scale. *Science of the Total Environmen*, 551, 631-639. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.036.
Fischer, T., Veste, M., Wiehe, W., & Lange, P. (2010). Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany. *Catena*, 80, 47-52. https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.08.009.
Galitskaya, P., Biktasheva, L., Blagodatsky, S., & Selivanovskaya, S. (2021). Response of bacterial and fungal communities to high petroleum pollution in different soils. *Scientific Reports*, 11(1),1-18.

https://doi.org/10.1038/s41598-020-80631-4.
Gams, W., Verkley, G. J. M., & Crous, P. W. (2007). CBS Course of Mycology (5th ed). Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht, the Netherlands, 242 p.
Garbeva, P., Tyc, O., Remus-Emsermann, M. N. P., Van der Wal, A., Vos, M., Silby, M., & De Boer, W. (2011). No apparent costs for facultative antibiotic production by the soil bacterium *Pseudomonas fluorescen* Pf0-1. *PLoS ONE,* 6(11), e27266. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027266.
Garrity, G. M., Boone, D. R., & Castenholz, R. W. (2001). *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, second ed, New York, USA,1: 173.
Gharemahmudli, S., Najafinejad, A., Sadeghi, S.H.R., Zarei Darki, B. Mohammadian Behbahani, A., & Kheirfam, H. (2020). Reducing Surface Runoff from Soils Subjected to a Freezing-Thawing Cycle using Soil Cyanobacteria. *Water and Soil Conservation, 27(3),* 163-180. doi: 10.22069/jwsc.2020.17693.3318. (In Persian).
Gupta, A., Mishra, P., Pandey, C., Singh, U., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(1), 67-72. https://doi: 10.4103/aca.ACA_157_18.
Havrilla, C., Leslie, A.D., Di Biase, J.L., & Barger, N.N. (2020). Biocrusts are associated with increased plant biomass and nutrition at seedling stage independently of root-associated fungal colonization. *Plant and Soil*, 446, 331-342. https://doi.org/10.1007/s11104-019-04306-4.
Jafarpoor, A., Sadeghi, S. H. R., Zarei Darki, B., & Homaee, M. (2022a). Changes in hydrologic components from a mid-sized plots induced by rill erosion due to cyanobacterization, *Soil and Water Conservation Research*, 10(1), 143-148. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.05.002.
Jafarpoor, A., Sadeghi, S. H., Darki, B. Z., & Homaee, M. (2022b). Changes in morphologic, hydraulic, and hydrodynamic properties of rill erosion due to surface inoculation of endemic soil cyanobacteria. *Catena*, 208, 105782. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105782.
Khaledi Darvishan, A., Sadeghi, S. H. R., Homaee, M., & Arabkhedri, M. (2014). Measuring sheet erosion using synthetic color-contrast aggregates. *Hydrological Processes*, 28(15), 4463-4471. https://doi.org/10.1002/hyp.9956.
Kheirfam, H., Sadeghi, S. H. R., Zarei Darki, B., & Homaee, M. (2017a). Controlling rainfall-induced soil loss from small experimental plots through inoculation of bacteria and cyanobacteria. *Catena*, 152, 40-46. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.006.
Kheirfam, H., Sadeghi, S. H. R., Homaee, M., & Zarei-Darki, B. (2017b). Quality improvement of an erosion-prone soil through microbial enrichment. *Soil and Tillage Research*,165, 230-238. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.021.
Kheirfam, H., Homaee, M., Sadeghi, S.H.R., & Zarei Darki, B. (2017c). Role of Biological Soil Crusts Enrichment through Bacteria Inoculation and Stimulation of Nitrogen Increasing in an Erosion-Prone Soil. *Water and Soil*, 31(2), 545-556. doi: 10.22067/jsw.v31i2.54598.(In Persian).
Kheirfam, H., Sadeghi, S.H.R., Zarei Darki, B., & Homaee, M. (2018). Reducing soil and water loss through stimulation of soil bacteria in experimental small plots. *Water and Soil Conservation*, 25(4): 243-257. doi: 10.22069/jwsc.2018.14361.2910.(In Persian).
Kheirfam, H., Sadeghi, S. H. R., & Zarei Darki, B. (2020). Soil conservation in an abandoned agricultural rain-fed land through inoculation of cyanobacteria. *Catena*, 187, 104341. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104341.
Komarek, J., & Anagnostidis, K. (1999). *Süsswasserflora von Mitteleuropa* Bd. 19/1: Cyanoprokaryota: Teil/Part 1: Chroococcales. Spektrum Akademischer Verlag. In German,548p.
Koolivand, A., Abtahi, H., Godini, K., Saeedi, R., Rajaei, M. S., & Parhamfar, M. (2019). Biodegradation of oil tank bottom sludge using a new two-phase composting process: Kinetics and effect of different bulking agents. *Material Cycles and Waste Management*, 21(6), 1280-1290. https://doi.org/10.1007/s10163-019-00881-x.
Li, X. R., Zhang, P., Su, Y. G., & Jia, R. L. (2012). Carbon fixation by biological soil crusts following revegetation of sand dunes in arid desert regions of China: A four-year field study.*Catena*, 97, 119-126. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.009.
Lutton, E., Schellevisa, R., & Shanmuganathan, A. (2013). Culture-dependent methods increase observed soil bacterial diversity from Marcellus shale temperate forest in Pennsylvania. student Research, 2(1), 9-16. https://doi.org/10.47611/jsr.v2i1.110.
Miralles, I., Trasar-Cepeda, C., Leiros, M. C., & Gil-Sotres, F. (2013). Labile carbon in biological soil crusts in the Tabernas desert, SE Spain. *Soil Biology and Biochemistry*, 5,1-8.

https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.010.
Mohammadi, S., Homaee, M., & Sadeghi, S.H.R., (2015). Runoff Generation in Kerosene and Gas Oil Contaminated Soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(1): 121-131. doi: 10.22059/ijswr.2015.54301.(In Persian).
Mohammadi, S., Homaee, M., & Sadeghi, S. H. R. (2018). Runoff and sediment behavior from soil plots contaminated with kerosene and gasoil. *Soil and Tillage Research*, 182, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.015.
Mohsenzadeh, F., Zafar, D., & Noorisafa, B. (2016). Adaptation of some fungal species of *Trichoderma* to petroleum, Cellular and Molecular Researches *(Iranian Journal of Biology)*, 29(3), 321-330.(In Persian).
Muller, K., Mason, K., Strozzi, A. G., Simpson, R., Komatsu, T., Kawamoto, K., & Clothier, B. (2019). Runoff and nutrient loss from a water-repellent soil. *Geoderma*, 322, 28-37. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.019.
Norozpour, M., Sarikhani, M.R., & Aliasgharzad, N. (2023). Monitoring of soil respiration changes in a heavy naphtha-contaminated sandy loam soil under different bioremediation treatments. *Water and Soil Science*, doi:10.22034/WS.2021.47654.2436. doi: 10.22034/ws.2021.47654.2436.(In Persian).
Rathod, V.P., Parekh, H. H., Rajpura, P. D., Shah, M. V., Singh, Sh. R., Panchal, R. R., & Upadhy, V. J. (2022). Effect of bioremediation technique on engineering properties of crude oil-contaminated soil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 43, 102393. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102393.
Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics*, *2*(1), 21-33.
Ritz, K., & Young, I. M. (2004). Interactions between soil structure and fungi. *Mycologist*, 18(2),52-59. https://doi.org/10.1017/S0269915X04002010.
Rodríguez-Caballero, E., Canton, Y., Chamizo, S., Lazaro, R., & Escudero, A. (2013). Soil loss and runoff in semiarid ecosystems: A complex interaction between biological soil crusts, microtopography and hydrological drivers. *Ecosystems*, 16(4), 529-546. https://doi.org/10.1007/s10021-012-9626-z.
Roman, J. R., Roncero-Ramos, B., Rodríguez-Caballero, E., Chamizo, S., & Canton, Y. (2021). Effect of water availability on induced cyanobacterial biocrust development. *Catena*,197,104988. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104988.
Rossi, F., Mugnai, G., & Philippis, R.D. (2017). Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts. *Plant and Soil*, 1-16
Rossi, F., Mugnai, G., & De Philippis, R. (2018). Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts. *Plant and Soil*, 429, 19-34. https://doi.org/10.1007/s11104-017-3441-4.
Sadeghi, S. H. R., Abdollahi, Z., & Khaledi Darvishan, A. (2013). Experimental comparison of some techniques for estimating natural rain drop size distribution in southern coast of Caspian Sea, Iran. *Hydrological Sciences*. 58(6), 1374-1382. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.814917.
Sadeghi, S.H.R., Kheirfam, H., Homaee, M., & Zarei Darki, B. (2017*a)*. Improvability of Water Infiltration in an Erosion-Prone Soils under Laboratorial Conditions through Artificial Increasing of Soil Microorganisms Population. *Iranian Journal of Soil and Water Research*,47(4), 797-805. i: 10.22059/ijswr.2016.59986.(In Persian).
Sadeghi, S. H. R., Kheirfam, H., Homaee, M., Zarei Darki, B., & Vafakhah, M. (2017b). Improving runoff behavior resulting from direct inoculation of soil micro-organisms. *Soil and Tillage Research,* 171, 35-41. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.04.007.
Sadeghi, S.H.R., Jafarpoor, A., Zabihi Silabi, M., Molashahi, Sh., Naghdi, M., Sharifi Moghani, M., Ghysoori, Z., & Farzadfar, E. (2021a). Biologic Management Framework of Soil Erosion in the Watershed (Applied study: Oshnavieh Galazchai, West Azerbaijan, Iran). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), 997-1010. doi: 10.22059/ijswr.2021.317114.668871.(In Persian).
Sadeghi, S. H. R., Najafinejad, A., Gharemahmudli, S., Zarei Darki, B., Behbahani, A. M., & Kheirfam, H. (2021b). Reduction in soil loss caused by a freeze-thaw cycle through inoculation of endemic soil microorganisms. *Applied Soil Ecology*, 157, 103770. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103770.
Sadeghi, S. H., Jafarpoor, A., Homaee, M., & Darki, B. Z. (2023). Changeability of rill erosion properties due to microorganism inoculation. *Catena*, 223, 106956. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106956.
Safehian, H., Rajabi, A. M., & Ghasemzadeh, H. (2018). Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. *Engineering Geology*, 241, 55-63. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.020.
Salmazo, P., De Marco, N., Soeiro, V. S., Castanho, N. R. C. M., Leite, F. G., Chaud, M. V., Grotto, D., & Jozala, A. F. (2023). Evaluation of *Bacillus subtilis* as a tool for biodegrading diesel oil and gasoline in experimentally contaminated water and soil. *Current Microbiology*, 80(3), 94.

https://doi.org/10.1007/s00284-022-03175-y.

Schrey, S. D., Erkenbrack, E., Früh, E., Fengler, S., Hommel, K., Horlacher, N., Schulz, D., Ecke, M., Kulik, A., Fiedler, H. P., Hampp, R., & Tarkka, M. T. (2012). Production of fungal and bacterial growthmodulating secondary metabolites is widespreadamong mycorrhiza-associated streptomycetes, *BMC Microbiology*, 12: 164. https://doi.org/10.1186/1471-2180-12-164.

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52(3/4): 591-611. https://doi.org/10.2307/2333709.

Sharma, R., Singh, G., & Sharma, V.K. (2011). Comparison of different media formulation on growth, morphology and chlorophyll content of green alga, *Chlorella vulgaris*. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, 2(2), 509-516.

Sileshi, G., & Mafongoya, P.L. (2006). Long-term effect of improved legume fallows on soil invertebrate macrofauna and maize yield in eastern Zambia. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 115, 69-78. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.12.010.

Tiwari, O. N., Bhunia, B., Mondal, A., Gopikrishna, K., & Indrama, T. (2019). System metabolic engineering of exopolysaccharide-producing cyanobacteria in soil rehabilitation by inducing the formation of biological soil crusts: A review. *Cleaner Production*,211,70-82. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.188.

Tucker, C. L., McHugh, T. A., Howell, A., Gill, R., Weber, B., Belnap, J., Grote, E., & Reed, S. C. (2017). The concurrent use of novel soil surface microclimate measurements to evaluate CO^2 pulses in biocrusted interspaces in a cool desert ecosystem. *Biogeochemistry*, 135, 239-249. https://doi.org/10.1007/s10533-017-0372-3.

Varjani, S.J., & Upasani, V.N. (2017). A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *Int Biodeterior Biodegradation*, 120(1), 71-83. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.006.

Vieira, F. C. S., & Nahas, E. (2005). Comparison of microbial numbers in soils by using various culture media and temperatures. *Microbiological Research*, 160(2), 197-202. https://doi.org/10.1016/j.micres.2005.01.004.

Zarei Dark, B., Seyfabadi, J., & Fayazi, S. (2017). Effect of nutrients on total lipid content and fatty acids profile of *Scenedesmus obliquus*. *Agriculture, Agribusiness and Biotechnology*, (60), e17160304. https://doi.org/10.1590/1678-4324-2017160304.

Zhao, Y., & Xu, M. (2013). Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the hilly Loess Plateau region, China: influence of biocrust patches and plant canopies. *Hydrologic Engineering*, 18(4), 387-393. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000633.

Studying Behavior of Runoff Generation in a Gasoil Contaminated Soils due to Inoculation of Soil Microorganism

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

One of the main indicators of land degradation is the rapid and massive runoff production, which threatens the sustainable livelihood of communities and food security with the loss of water resources and damages caused by sediment yield and floods. So that the need to comprehensively examine the effective factors in it is prioritized. In addition to the production of runoff and soil loss due to erosion, as a result of environmental processes and human activities, the soil is exposed to various pollutants resulting from mining, urban and industrial sewage, garbage and waste disposal, transportation, oil refining and transfer, industrial production. Oil pollution usually occurs around refineries and oil discovery mines, leakage of petroleum compounds from worn-out storage tanks of oil refineries and oil transmission lines, as well as due to the loading or unloading of oil in tankers and disposal of petroleum waste in the soil. Oil pollution has become one of the most important concerns of environmentalists due to its toxicity, entering the food chain and causing disease in living organisms, especially humans, and contamination of underground and surface water and soil resources.

Objective:

Runoff is one of the most important hydrological processes in ecosystems, which is very important in the management and conservation of water and soil resources. Although the use of soil microorganisms as soil inoculants in the bioengineering management of runoff has been confirmed, the use of soil microorganisms to control runoff in soils contaminated with petroleum has not been considered. Therefore, in order to evaluate individual and combined inoculation of soil Bacteria, Cyanobacteria and fungi in reducing runoff in soil contaminated with petroleum, the present study was carried.

Materials and methods:

Therefore, in order to evaluate individual and combined inoculation of soil Bacteria, Cyanobacteria and fungi in reducing runoff in soil contaminated with petroleum, the present study was carried at plots of 0.5×0.5 m with constant slope of some 25% and level of 20000 mg kg-1 of gasoil and control contamination in three replicates. The plots will be then subjected to rainfall intensity of some 35 mm h−1 and duration of 30 min installed at the Rainfall Simulation Laboratory of Tarbiat Modares University at Faculty of Natural Resources.

Results and discussion:

The results showed that the inoculation treatments, although there was no significant difference compared to the control treatment ($P>0.05$) except for the start of runoff ($P<0.05$), improved the components of runoff. The comparison of the mean of the study variables showed that the bacteria, cyanobacteria, fungi, bacteria+fungi, bacteria+cyanobacteria, cyanobacteria+fungi, and bacteria+cyanobacteria+fungi caused +47.10, -0.08, -10.72, -24.86, +14.85, +49.88 and +27.88 percent changes in runoff start time, +4.58, -54.04, +65.19, +72.20, -41.36, -84. 53 and +40.15 percent changes in runoff volume, and +4.75, +54.06 and -65.15, +72.28, -41.39 and -84.55 and +40.20 percent changes in runoff coefficient, respectively.

Conclusion:

The results of the research indicated the relative synergistic performance of the combination treatment of cyanobacteria + fungi in reducing the effect of gasoil on runoff properties. The results of the present study showed that the inoculation of native soil bacteria, cyanobacteria, and fungi can be an efficient and sustainable biological technology to improve runoff characteristics in areas contaminated with petroleum.

Keywords: Biological Crust, Petroleum Pollutants, Runoff Control, Soil and Water Conservation.