



Original Article



Comparative evaluation of the bioremediation potential of *Chlorella vulgaris* for light crude oil from the Behregan oil field, in the presence of chemical dispersants (Galmen OD4000 and Slikgon)

Maryam Yali¹ , Mozghan Emtyazjoo¹ , Sahar jalili^{2*} 

1. Department of Marine Biology, NTC, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Department of Fisheries, Arv.C. Islamic Azad University, Abadan, Iran.

Article history:

Received: 15 February 2026

Revised: 17 May 2026

Accepted: 28 May 2026

ePublished: 28 May 2026

*Corresponding author: Sahar jalil,
Department of Fisheries, Arv.C.
Islamic Azad University, Abadan,
Iran.

E-mail: Sahar.jalili2024@iau.ac.ir

Abstract

Bioremediation of crude oil, as a sustainable approach for reducing hydrocarbon pollution, requires simultaneous optimization of biological and environmental factors. This study investigated the bioremediation efficiency of *Chlorella vulgaris* in combination with two chemical dispersants, Slikgon and Galmen OD4000. The experimental treatments were conducted using *Chlorella vulgaris* culture medium at three concentrations of Behregan oil field light crude oil (16.25, 32.5, and 48.75 mL), combined with three concentrations of the two dispersants (0.825, 1.625, and 2.43 mL), under three pH levels (5, 7, and 9). Results of crude oil bioremediation in the presence of *C. vulgaris* and the two dispersants under neutral conditions (pH = 7) showed no statistically significant effect ($p \geq 0.5$). Under acidic conditions (pH = 5), the Galmen OD4000 dispersant exhibited higher efficiency than Slikgon. At alkaline pH (pH = 9), increasing the concentration of Behregan light crude oil led to a reduction in removal efficiency by Slikgon; however, for Galmen OD4000, the removal efficiency increased up to 32.5 mL of oil, followed by a decline at higher concentrations. Nutrient ratio analysis revealed that a phosphorus-to-nitrogen ratio of 1:10 provided the highest biological performance, while excessive nitrogen without proportional phosphorus decreased bioremediation efficiency. Overall, the results indicated that dispersant performance is pH-dependent. Galmen OD4000 showed superior efficiency under both acidic and alkaline conditions, attributed to its higher oil-in-water emulsion stability and better compatibility with the algal cell surface. These findings suggest that simultaneous adjustment of pH, oil concentration, and nutrient ratios can maximize bioremediation efficiency and offer practical guidance for designing biological oil-cleanup systems in contaminated marine environments.

Keywords: *Chlorella vulgaris*, bioremediation, dispersant, Slikgon, Galmen OD4000.

Please cite this article as follows: Yali M., Emtyazjoo M., Jalili S. Comparative Evaluation of the Bioremediation Potential of *Chlorella vulgaris* for Light Crude Oil from the Behregan Oil Field in the Presence of Chemical Dispersants (Galmen OD4000 and Slikgon. J Mar Bio, 2026; 18(1): 23–39. DOI:



Copyright © 2026 Journal of Marine Biology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

مقاله اصلی

مقایسه ظرفیت زیست‌پالایی جلبک کلرلا ولگاریس (*Chlorella vulgaris*) در حذف نفت خام سبک بهرگان در حضور دو پراکنده‌ساز گملن OD4000-اسلیک‌گان

مریم یلی^۱، مژگان امتیازجو^۱، سحر جلیلی^{۲*}

۱. گروه بیولوژی دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲. گروه شیلات، واحد بین‌الملل اروند، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران.

چکیده

زیست‌پالایی با استفاده از میکروجلبک‌ها رویکردی مؤثر و سازگار با محیط‌زیست برای کاهش آلودگی‌های نفتی است، اما کارایی آن به شرایط فیزیکی و شیمیایی محیط وابسته است. در این پژوهش، عملکرد جلبک *Chlorella vulgaris* در حذف نفت خام سبک بهرگان - که به دلیل مصرف گسترده در صنایع جنوب ایران و احتمال ورود به محیط‌های ساحلی اهمیت زیست‌محیطی بالایی دارد - طی یک دوره انکوباسیون ۲۱ روزه بررسی شد. سه عامل pH (۵، ۷ و ۹)، نوع پراکنده‌ساز (اسلیک‌گان و گملن OD4000) و غلظت نفت (۱۶/۲۵، ۳۲/۵ و ۴۸/۷۵ mL/L) در قالب طرح آزمایشی سه‌راهه ارزیابی شدند تا اثرات اصلی و تعاملی آن‌ها بر راندمان زیست‌پالایی مشخص شود. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که هر سه عامل pH ($p=0.047$)، نوع پراکنده‌ساز ($p<0.001$) و غلظت نفت ($p<0.001$) اثر معنی‌داری بر حذف نفت دارند و تمامی اثرات متقابل نیز معنی‌دار بودند ($p<0.05$). بیشترین راندمان حذف در نسبت مغذی ۱:۱۰ فسفر به نیتروژن مشاهده شد و راندمان‌های حاصل در سه غلظت نفت به ترتیب ۵۸/۸، ۶۲/۸ و ۵۶/۶ درصد بود. همچنین کارایی پراکنده‌ساز گملن OD4000 در pH=۵ بیشترین مقدار را نشان داد، در حالی که در pH=۹ این برتری تنها تا غلظت ۳۲.۵ میلی‌لیتر نفت حفظ شد و در غلظت‌های بالاتر کاهش راندمان مشاهده گردید. این الگو بیانگر حساسیت بالای فرآیند زیست‌پالایی به نوسانات pH، نوع ماده کمکی و شدت آلودگی نفتی است. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که *Chlorella vulgaris* توان بالقوه قابل‌توجهی در حذف ترکیبات نفتی دارد، اما دستیابی به بیشترین بازده تنها در صورت تنظیم هم‌زمان pH مناسب، انتخاب پراکنده‌ساز کارآمد، کنترل بار آلودگی نفتی و تأمین نسبت بهینه عناصر مغذی امکان‌پذیر است. این نتایج می‌تواند در طراحی سامانه‌های پاکسازی زیستی مؤثرتر برای محیط‌های ساحلی و صنعتی آلوده به نفت به کار گرفته شود و مبنایی عملی برای توسعه روش‌های کم‌هزینه و پایدار در مدیریت آلودگی‌های نفتی فراهم آورد.

واژگان کلیدی: *Chlorella vulgaris*، زیست‌پالایی نفت خام، اسلیک‌گان، گملن OD4000.

تاریخچه مقاله

- تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶
تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۵/۲/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۳/۷
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۳/۷

تمامی حقوق برای دانشگاه آزاد اهواز محفوظ است.

* نویسنده مسئول: سحر جلیلی، گروه شیلات، واحد بین‌الملل اروند، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران.

ایمیل:

Sahar.jalili2024@iau.ac.irr

استناد: یلی، مریم؛ امتیازجو، مژگان؛ جلیلی، سحر. مقایسه ظرفیت زیست‌پالایی جلبک کلرلا ولگاریس (*Chlorella vulgaris*) در حذف نفت خام سبک بهرگان در حضور دو پراکنده‌ساز گملن OD4000-اسلیک‌گان. مجله زیست‌شناسی دریا، بهار ۱۴۰۵؛ ۱۸(۱): ۲۳-۳۹

مقدمه

آلودگی‌های نفتی به‌عنوان یکی از چالش‌های عمده زیست‌محیطی در عصر حاضر شناخته می‌شوند. روزانه میلیون‌ها تن ترکیبات هیدروکربنی شامل اجزای سبک و سنگین نفتی، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) و مشتقات مرتبط به آن به آب‌های سطحی و دریایی وارد می‌گردد (Sheikh Abdullah et al., 2020). این ترکیبات به‌دلیل سمیت، پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر تجزیه طبیعی، ظرفیت خودپالایی اکوسیستم‌های آبی را کاهش داده و می‌توانند پیامدهای جدی برای تنوع زیستی و سلامت انسان به‌همراه داشته باشند.

منابع اصلی انتشار این آلاینده‌ها شامل نشت از چاه‌ها و سکوها، استخراج، شکست خطوط انتقال و وقوع سوانح در فرآیند حمل‌ونقل نفت است. از این رو، انتخاب و به‌کارگیری راهکارهای کارآمد برای کنترل و حذف آلودگی‌های نفتی نیازمند توجه هم‌زمان به ملاحظات زیست‌محیطی، هزینه‌های اجرایی و کارایی بلندمدت روش‌ها است (Smith & Lee, 2022).

در یک تقسیم‌بندی کلی، روش‌های حذف لکه‌های نفتی به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و زیستی تقسیم می‌شوند. در میان این رویکردها، زیست‌پالایی به‌دلیل سازگاری با محیط‌زیست، هزینه پایین‌تر و امکان حذف پایدارتر آلاینده‌ها، مورد توجه فزاینده پژوهشگران قرار گرفته است. در این فناوری، میکروارگانیسم‌ها مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها و ریزجلبک‌ها با بهره‌گیری از فرایندهای متابولیکی، موجب تجزیه یا کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی در محیط‌های آلوده می‌گردند.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی نشان داده‌اند که برخی گونه‌های ریزجلبکی قادرند طی فرایندهای اکسیداسیون زیستی، طیف گسترده‌ای از هیدروکربن‌های نفتی را به ترکیبات ساده‌تر و کم‌خطرتر تبدیل کنند؛ موضوعی که ظرفیت بالای این موجودات را برای کاربرد در سامانه‌های پالایش زیستی مورد تأیید قرار می‌دهد (Song et al., 2022; El-Sheikh et al., 2013). با این حال، همچنان برای درک دقیق مکانیسم‌های مؤثر و همچنین شناخت عوامل محیطی کلیدی بر کارایی این فرایندها، به پژوهش‌های بیشتری نیاز است.

از سوی دیگر، گیاهان آبی نیز در کنار میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی در بهبود عملکرد زیست‌پالایی دارند. به‌ویژه گونه‌های ریشه‌دار مانند: *Eichhornia crassipes* (سنبل آبی)، *Lemna minor* (عدسک آبی) و *Typha latifolia* (نی) از طریق توسعه سیستم ریشه‌ای و افزایش سطح تماس، امکان تعامل بیشتر آلاینده‌ها با جوامع میکروبی تجزیه‌کننده را فراهم می‌کنند و در نتیجه نرخ تجزیه زیستی هیدروکربن‌ها را افزایش می‌دهند (Hunt et al., 2018; Singh et al., 2019). همچنین استقرار این گیاهان می‌تواند غلظت ترکیبات نفتی را کاهش داده و به احیای پارامترهای اکولوژیکی و بازیابی پویایی زیست‌بوم‌های تخریب‌شده کمک کند (Patel, 2019; Khtar et al., 2023). علاوه بر نقش مستقل گیاهان، گزارش شده است که هم‌افزایی میان گیاهان آبی و میکروارگانیسم‌ها، راندمان حذف آلاینده‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. به عنوان نمونه، سامانه‌های همزیست شامل *Lemna minor* و باکتری‌های نفت‌خوار قادرند حذف هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را تا بیش از ۹۰٪ افزایش دهند.

افزون بر جذب مستقیم ترکیبات آلاینده، گیاهان آبی با ترشح ترکیبات آلی، تولید و تنظیم شرایط اکسیژن‌دار/بی‌اکسیژن در ناحیه ریزوسفری و همچنین کمک به فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو، فرآیند تخریب هیدروکربن‌ها را تسهیل می‌کنند (Boter et al., 2024). بنابراین، رویکرد گیاه‌پالایی به‌عنوان یک راهکار پایدار، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست، برای مدیریت آلودگی‌های نفتی مورد توجه قرار گرفته است (Doe et al., 2024). همچنین در برخی مطالعات، استفاده هم‌زمان از جلبک‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها (از جمله سیانوباکتری‌ها) به‌عنوان راهبردی برای حذف آلاینده‌ها همراه با تولید بیوانرژی پیشنهاد شده است (Hamounda et al., 2023).

با این پیشینه، تمرکز بر گونه‌های مشخص ریزجلبکی در حذف آلاینده‌های نفتی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این میان، گونه *Chlorella vulgaris* به‌عنوان یک ریزجلبک سبز با نرخ رشد بالا و توانایی تحمل نسبی در برابر آلاینده‌های نفتی شناخته می‌شود. گزارش شده است که *C. vulgaris* در حضور نفت خام و نیز ترکیبات هیدروکربنی آروماتیک چندحلقه‌ای قادر است بخش قابل توجهی از این آلاینده‌ها را در مدت زمان نسبتاً کوتاهی

کاهش دهد. همچنین در برخی شرایط آزمایشگاهی افزایش تولید زیست‌توده در حضور آلاینده‌ها مشاهده شده که می‌تواند بیانگر سازگاری متابولیکی این ریزجلبک با محیط‌های آلوده باشد (Amaral et al., 2023).

علاوه بر قابلیت‌های ذاتی *C. vulgaris*، شرایط کشت نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در شرایط میکسوتروفیک (ترکیبی از فتوسنتز و جذب مواد آلی)، *Chlorella vulgaris* در غلظت‌های مشخصی از نفت خام تا حدود ۱ درصد توانایی قابل توجهی برای تجزیه ترکیبات نفتی دارد. در این راستا، تغییرات در رنگیزه‌های فتوسنتزی و الگوی رشد جلبک در پاسخ به سطوح مختلف نفت گزارش شده است که بر لزوم بهینه‌سازی شرایط عملیاتی برای دستیابی به کارایی مطلوب تأکید می‌کند (Chinwe, 2024). همچنین افزودن *C. vulgaris* به محیط‌های آبی آلوده می‌تواند فعالیت میکروارگانیزم‌های بومی را تحریک کرده و مسیر تخریب ترکیبات نفتی را تسریع نماید؛ به گونه‌ای که در چنین سامانه‌هایی، برهم‌کنش میان جلبک و جوامع میکروبی موجب افزایش کارایی حذف آلاینده می‌شود (Ugboma et al., 2023; Zhao et al., 2023).

مطالعات مقایسه‌ای نیز نشان داده‌اند که *C. vulgaris* به دلیل ویژگی‌های فیزیولوژیکی و متابولیکی، می‌تواند گزینه مناسبی برای استفاده در سامانه‌های زیستی تصفیه محیط‌های آبی آلوده به نفت باشد؛ از جمله اینکه *Skeletonema costatum* نیز در برخی پژوهش‌ها به‌عنوان گونه مقایسه‌ای به کار رفته است (Xaaldi Kalhor et al., 2016; El-Sheikh et al., 2013). با این حال، نرخ رشد و فعالیت متابولیکی ریزجلبک‌ها به عوامل غیرزیستی متعددی از جمله شدت نور، دما و در دسترس بودن مواد مغذی وابسته است (Olukunle et al., 2013). بنابراین، رسیدن به عملکرد بهتر در فرآیند زیست‌پالایی نیازمند تعیین شرایط بهینه برای کشت و فعال‌سازی *C. vulgaris* در حضور نفت است (Xaaldi Kalhor et al., 2017).

با توجه به افزایش روند آلودگی‌های نفتی در اکوسیستم‌های آبی و نیز نیاز به توسعه فناوری‌های مؤثر و سازگار با محیط‌زیست، پژوهش حاضر بر آن است تا نقش *Chlorella vulgaris* را در حذف هیدروکربن‌های نفتی بررسی کند. همچنین هدف تحقیق، ارزیابی اثر دو نوع پراکنده‌ساز در کنار *C. vulgaris* و تعیین شرایط بهینه برای دستیابی به بیشترین کارایی در فرآیند زیست‌پالایی است.

مواد و روش‌ها

کشت جلبک

ریزجلبک *Chlorella vulgaris* از پارک علم و فناوری ایران (تهران) تهیه شد. کشت جلبک در آکواریوم‌های شیشه‌ای تحت تابش نور فلورسنت با شدت ۲۰۰۰ لوکس (۲×۱۰۰۰ لوکس) و با دوره نوری ۱۶:۸ ساعت (نور: تاریکی) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام گرفت. برای رشد جلبک از محیط کشت Convey استفاده شد (جدول ۱). کشت‌ها در بالن‌های ارلن‌مایر انجام شدند و تغییرات چگالی سلولی به‌صورت روزانه (هر ۲۴ ساعت) و در سه تکرار مورد پایش قرار گرفت. شمارش کمی سلول‌ها با استفاده از لام هموسیتمومتر انجام شد (Vaičiulytė et al., 2014).

جدول ۱. ترکیب محیط کشت Convey مورد استفاده برای *Chlorella vulgaris*

ردیف	ترکیب شیمیایی	فرمول شیمیایی	غلظت (g/L)
۱	نیترات پتاسیم	KNO ₃	۱۰۰
۲	دی‌سدیم اتیلن دی‌آمین تترا استیک اسید	Na ₂ EDTA	۴۵
۳	اسید بوریک	H ₃ BO ₃	۳۳/۶
۴	دی‌هیدروژن فسفات سدیم مونو هیدرات	NaH ₂ PO ₄ ·4H ₂ O	۲۰
۵	آهن (III) کلرید هگزا هیدرات	FeCl ₃ ·6H ₂ O	۱/۳
۶	منگنز (II) کلرید	MnCl ₂	۰/۳۶
۷	روی (II) کلرید	ZnCl ₂	۲۱
۸	کبالت (II) کلرید هگزا هیدرات	CoCl ₂ ·6H ₂ O	۲۰
۹	آمونیم مولیبدات تتراهیدرات	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	۹
۱۰	مس (II) سولفات پنتا هیدرات	CuSO ₄ ·5H ₂ O	۲۰
۱۱	سدیم سیلیکات	Na ₂ SiO ₃	۲۰
۱۲	ویتامین B1 (تیامین)	-	۲
۱۳	ویتامین B12 (کوبالامین)	-	۰/۱

آماده سازی محلول‌ها جهت در معرض گذاری

نفت خام سبک میدان بهرگان در خلیج فارس به صورت تازه و بدون اعمال فرایند هوازدگی از شرکت نفت فلات قاره ایران تهیه و استفاده شد. جهت بررسی اثرات سطوح مختلف آلودگی نفتی بر توان زیست‌پالایی ریزجلبک *Chlorella vulgaris*، سه غلظت نفت خام شامل ۱۶/۲۵، ۳۲/۵۰ و ۴۸/۷۵ میلی‌لیتر در هر لیتر محیط کشت به‌عنوان تیمارها انتخاب گردید. محدوده غلظت‌های مذکور بر پایه مطالعات مشابه پیشین (Flayyih & AL Magdomy, 2025; Zhao et al., 2023) و نتایج آزمایش‌های مقدماتی جهت پوشش دامنه سمیت زیرکشنده تا نزدیک به آستانه سمیت حد تعیین شد تا اثرات آن بر رشد و راندمان زیست‌پالایی ارزیابی گردد.

محاسبه نسبت نفت به پراکنده ساز (O:D Ratio)

این نسبت به سادگی مقدار نفت موجود در لکه را به مقدار پراکنده سازی که باید روی آن اعمال شود، مرتبط می‌سازد (رابطه شماره ۱)

$$\text{رابطه شماره ۱: } \frac{\text{حجم یا جرم نفت}}{\text{حجم یا جرم پراکنده ساز}} = \text{نسبت نفت به پراکنده ساز}$$

در این پژوهش، نسبت نفت به پراکنده‌ساز بر اساس رابطه (۱) تعیین گردید. برای پراکنده‌ساز Slickgone از نسبت ۱:۲۰ (یک واحد حجمی پراکنده‌ساز به ازای ۲۰ واحد حجمی نفت) و برای پراکنده‌ساز Gamlen OD4000 از نسبت ۱:۳۰ استفاده شد. انتخاب این نسبت‌ها بر اساس مطالعات پیشین (شمسی‌زاده، ۱۳۹۱؛ امتیازجو و همکاران، ۱۳۹۴) و دستورالعمل‌های کاربردی در شرایط مشابه دریایی انجام گرفت. پراکنده‌سازهای مورد استفاده از فهرست مواد مورد تأیید سازمان منطقه‌ای حفاظت از محیط زیست دریایی (ROPME) برای خلیج فارس انتخاب و از شرکت ملی نفت فلات قاره ایران تهیه شدند.

معروض گذاری نمونه ها

پیش تیمار جلبک

ریزجلبک *Chlorella vulgaris* در محیط کشت کانوی و تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاهی نگهداری و تکثیر شد. به منظور حذف اثرات کربن آلی باقی مانده از محیط‌های کشت پیشین و ایجاد سازگاری فیزیولوژیک در سلول‌ها، پیش از آغاز آزمایش‌ها کشت جلبکی به مدت ۹۶ ساعت در محیط فاقد هرگونه منبع کربن آلی نگهداری شد. در این مرحله، تأمین کربن محدود به کربن معدنی موجود در هوا بود. هدف این پیش تیمار، تثبیت وضعیت متابولیسی سلول‌ها و کاهش ذخایر کربن درون سلولی بود تا در فاز آزمایشی، هیدروکربن‌های نفتی به عنوان تنها منبع کربن آلی قابل ارزیابی باشند.

یکنواخت سازی سوسپانسیون جلبکی

در پایان مرحله پیش تیمار، سوسپانسیون جلبکی به منظور یکسان سازی تراکم سلولی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۸۰ نانومتر اندازه گیری شد. بر این اساس، کدری نوری (Optical Density; OD) سوسپانسیون در مقدار مشخصی تنظیم گردید. این اقدام سبب شد تمامی راکتورها با تراکم اولیه سلولی یکسان آغاز شوند و در نتیجه، تفاوت‌های مشاهده شده در طول آزمایش تنها ناشی از اثر تیمارهای اعمال شده باشد.

آماده سازی راکتورهای آزمایشی

برای آماده سازی هر راکتور، ابتدا ۲۵۰ میلی لیتر از سوسپانسیون یکنواخت شده جلبک به ۵۰۰ میلی لیتر محیط کشت تازه کانوی افزوده شد تا حجم اولیه سامانه به ۷۵۰ میلی لیتر برسد. در ادامه، مقادیر تعیین شده نفت خام سبک خلیج فارس-بهرگان و پراکنده سازهای مورد استفاده بر اساس غلظت‌های تیماری به این حجم اولیه افزوده شدند. پس از افزودن نفت و پراکنده ساز، حجم نهایی هر راکتور با استفاده از محیط کشت کانوی تا مقدار دقیق ۱۰۰۰ میلی لیتر تنظیم گردید. بر این اساس: نفت خام و پراکنده ساز جزئی از حجم نهایی ۱۰۰۰ میلی لیتری محاسبه شدند. تمامی غلظت‌های تیماری بر پایه حجم نهایی ۱ لیتر محاسبه شده‌اند. افزایش حجم پس از افزودن نفت و پراکنده ساز انجام شده است.

به منظور استاندارد سازی زیست توده اولیه، تمامی راکتورها با استفاده از ۲۵۰ میلی لیتر کشت فعال *Chlorella vulgaris* در فاز رشد نامی تلقیح شدند که به ۵۰۰ میلی لیتر محیط کشت تازه کانوی افزوده شد. تمامی تیمارها از یک کشت مادر واحد و هم‌زمان تهیه گردیدند تا شرایط فیزیولوژیک اولیه کاملاً یکنواخت باشد. اگرچه اندازه گیری کمی غلظت زیست توده (شامل OD، تعداد سلول یا وزن خشک) در چارچوب پایان نامه انجام نشد، استفاده از حجم تلقیح ثابت و منبع کشت مشترک، یکنواختی زیست توده اولیه در تمام تیمارها را تضمین نمود. از آنجا که هدف پژوهش حاضر ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد حذف زیستی نفت تحت تیمارهای مختلف بود و نه بررسی رشد کمی زیست توده، این رویکرد برای حفظ اعتبار درون آزمایشی کفایت داشت.

تمامی راکتورها در دمای ثابت 25 ± 1 درجه سلسیوس نگهداری شدند. نوردهی با استفاده از لامپ‌های LED سفید با شدت حدود ۳۵۰۰ لوکس و در فاصله تقریباً ۲۰ سانتی متری انجام گرفت. چرخه نوری شامل ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی بود و در طول پژوهش ثابت نگه داشته شد.

pH محیط نیز در سه سطح ۵، ۷ و ۹ تنظیم شد تا اثر شرایط اسیدی، خنثی و قلیایی بر حذف زیستی نفت مورد ارزیابی قرار گیرد. به منظور تأمین دی‌اکسید کربن مورد نیاز برای فتوسنتز، جلوگیری از ته نشینی سلول‌ها و ایجاد اختلال مطلوب بین فاز آبی و نفتی، تمامی راکتورها تحت هوادهی پیوسته قرار گرفتند. هوادهی توسط پمپ آزمایشگاهی Aquanic ACO-6602 با دبی تقریبی ۱/۵ لیتر در دقیقه انجام شد. هوا پیش از ورود به سامانه از فیلتر ۰/۲۲ میکرومتری عبور داده شد. توزیع هوا از طریق سنگ هواده حباب ریز صورت گرفت که موجب اختلاط ملایم، یکنواخت و پایدار در محیط کشت شد بدون آن که تنش مکانیکی اضافی به سلول‌ها وارد شود.

تیمارهای نفت و پراکنده‌ساز

در این پژوهش از دو پراکنده‌ساز تجاری Slickgone و Gamlen OD4000، دارای تأییدیه ROPME، استفاده شد. غلظت پراکنده‌سازها در سه سطح ۰/۸۲۵، ۱/۶۲۵ و ۱/۴۳ (mL/L) تنظیم گردید. نفت خام سبک بهرگان در تمامی تیمارها با غلظت ثابت افزوده شد. انتخاب این محدوده غلظتی با توجه به آزمون‌های مقدماتی و دامنه کاربرد عملی در عملیات مقابله با نشت نفت صورت گرفت.

نگهداری نمونه‌ها پیش از استخراج و آنالیز

نمونه‌ها پس از برداشت، در دمای 1 ± 1 درجه سلسیوس و به مدت کمتر از ۲۴ ساعت نگهداری شدند و سپس بلافاصله تحت استخراج و آنالیز قرار گرفتند. نگهداری کوتاه مدت در دمای پایین به منظور جلوگیری از تغییرات زیستی، تبخیر اجزای فرار و اکسیداسیون هیدروکربن‌ها انجام شد.

جدول ۲. مشخصات تیمارهای مطالعه حاضر (نفت خام بهرگان، پراکنده ساز اسلیک گان و گملن OD4000)

مشخصات	غلظت نفت (ml/L)	غلظت پراکنده ساز اسلیک گان (ml/L)	غلظت پراکنده ساز گملن (ml/L)
تیمار ۱	۱۶/۲۵	۰/۸۲۵	-
تیمار ۲	۳۲/۵	۱/۶۲۵	-
تیمار ۳	۴۸/۷۵	۲/۴۳	-
تیمار ۴	۱۶/۲۵	-	۰/۸۲۵
تیمار ۵	۳۲/۵	-	۱/۶۲۵
تیمار ۶	۴۸/۷۵	-	۲/۴۳

آنالیز شیمیایی

استخراج و آماده‌سازی هیدروکربن‌های نفتی برای آنالیز طیفی

به‌منظور جداسازی و خالص‌سازی ترکیبات هیدروکربنی از نمونه‌های آلوده به نفت، فرآیند استخراج مایع-مایع با اصلاحات جزئی و بر اساس پروتکل گزارش‌شده توسط **شهبابی و همکاران (۱۳۸۸)** مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا، ۵۰ میلی‌لیتر از نمونه‌های هم‌وزن شده محیط کشت آلوده برداشت شد. عملیات استخراج در دو مرحله پی‌درپی انجام شد تا بازبایی کامل اجزای هیدروکربنی تضمین شود. در هر مرحله، ۱۰ میلی‌لیتر حلال تتراکلریدکربن (CCl_4) با گرید مخصوص آنالیز افزوده و پس از اختلاط مناسب، جداسازی فاز آلی انجام پذیرفت. فازهای آلی حاصل ادغام شده و به‌عنوان عصاره خام هیدروکربنی به کار گرفته شدند. اگرچه در بسیاری از پروتکل‌های جدید از n-hexane یا dichloromethane (DCM) استفاده می‌شود، انتخاب تتراکلریدکربن در این مطالعه با دو دلیل اصلی انجام گرفت: (۱) قابلیت استخراجی بسیار بالا برای هیدروکربن‌های اشباع و آروماتیک سنگین، که کارایی آن را در بررسی تخریب نفت خام افزایش می‌دهد؛ (۲) سازگاری طیفی مناسب با آنالیز FT-IR و ایجاد حداقل نویز در محدوده باندهای هیدروکربنی، موضوعی که در روش مرجع نیز مورد تأکید قرار گرفته است. با توجه به سمیت و طبقه‌بندی این ماده به‌عنوان Carcinogen Class I، تمامی مراحل کار تنها در هود شیمیایی و با تهویه کامل انجام شد و از دستکش نیتریلی، عینک و ظروف مقاوم در برابر حلال استفاده گردید تا تماس، استنشاق یا انتشار بخارات به حداقل برسد. برای حذف ناخالصی‌های قطبی، فسفولیپیدها، مواد آلی محلول و باقی‌مانده‌های زیستی، عصاره خام از یک ستون کروماتوگرافی شیشه‌ای با طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۱ سانتی‌متر عبور داده شد. بستر ستون شامل مخلوطی از آلومینای فعال و فلوروسیل با نسبت جرمی ۱:۱ بود که عملکرد مناسبی در حذف ترکیبات ناخواسته و افزایش خلوص نهایی عصاره دارد. در ادامه، فاز آلی جمع‌آوری شده از یک لایه سولفات سدیم بدون آب (granular) عبور داده شد تا هرگونه رطوبت باقی‌مانده حذف گردد و محلول نهایی کاملاً خشک و برای آنالیز آماده شود. محلول خالص شده نهایی حاوی هیدروکربن‌های نفتی، مستقیماً برای تحلیل طیف‌سنجی مادون

قرمز (FT-IR) مورد استفاده قرار گرفت. تغییرات در باندهای مشخصه شامل C-H، C=C و C=O به‌عنوان شاخص کیفی تخریب زیستی اجزای نفت خام پس از تیمار جلبکی مورد بررسی قرار گرفت (Bordbare et al., 2008).

اندازه‌گیری مجموع هیدروکربن‌های نفتی (Total Petroleum Hydrocarbons) با طیف‌سنج مادون قرمز

اندازه‌گیری مجموع هیدروکربن‌های نفتی (TPHs) در فاز آلی استخراج‌شده با استفاده از طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) و بر اساس روش گزارش‌شده توسط (Pisal, 2011) انجام شد. این روش بر پایه اندازه‌گیری جذب ارتعاشات کششی پیوندهای C-H در هیدروکربن‌های آلیفاتیک در محدوده ۲۸۵۰-۲۹۳۰ cm^{-1} است. در این مطالعه، باند جذب ۲۹۲۰ cm^{-1} که مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های متیل و متیلن است به‌عنوان پیک اصلی برای کمی‌سازی انتخاب شد.

برای تهیه منحنی کالیبراسیون، محلول‌های استاندارد نفت خام در حلال تتراکلریدکربن (CCl_4) با غلظت‌های ۰، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ mg/L آماده گردید. جذب (A) هر استاندارد در باند ۲۹۲۰ cm^{-1} اندازه‌گیری و منحنی کالیبراسیون خطی با روش حداقل مربعات ترسیم شد. رابطه کمی به‌صورت زیر به‌دست آمد:

$$C = (A - b) / m$$

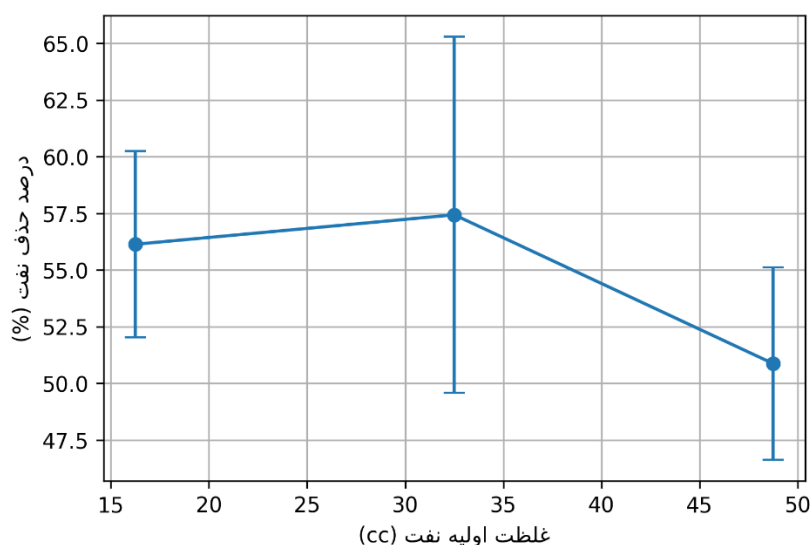
که در آن C غلظت TPH بر حسب mg/L ، A جذب، m شیب و b عرض از مبدأ است. ضریب همبستگی ($R^2 = 0.997$) بیانگر دقت و خطی‌ت مناسب منحنی در بازه انتخابی بود. پس از استخراج، فاز آلی برای حذف رطوبت احتمالی از میان سولفات سدیم بدون آب عبور داده شد و هیچ‌گونه تبخیر یا تغلیظ حلال انجام نشد تا از اتلاف ترکیبات فرار جلوگیری شود و اندازه‌گیری TPH با بیشترین دقت انجام گیرد. نمونه‌ها مستقیماً در سل مخصوص دستگاه FT-IR ریخته شدند و طیف در محدوده ۴۰۰-۴۰۰۰ cm^{-1} ثبت گردید. میزان جذب در پیک ۲۹۲۰ cm^{-1} استخراج و غلظت نهایی TPH با استفاده از معادله کالیبراسیون محاسبه شد.

آنالیز آماری

برای مقایسه اثرات غلظت نفت و استفاده از پراکنده‌سازها بر راندمان زیست‌پالایی توسط کلرلا و لگاریس (*Chlorella vulgaris*)، داده‌ها با استفاده از آزمون تحلیل واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) مورد ارزیابی قرار گرفت. هر تیمار با سه تکرار مستقل انجام شد تا اطمینان از تکرارپذیری و صحت نتایج حاصل شود. پس از بررسی فرضیات نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون تعقیبی توکی (Tukey's HSD) انجام شد تا تفاوت‌های معنی‌دار بین گروه‌ها مشخص شود. تمامی تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS نسخه ۱۹ و Microsoft Excel 2016 انجام گرفت. سطح معناداری آماری برای تمام آزمون‌ها $p < 0.05$ در نظر گرفته شد.

نتایج

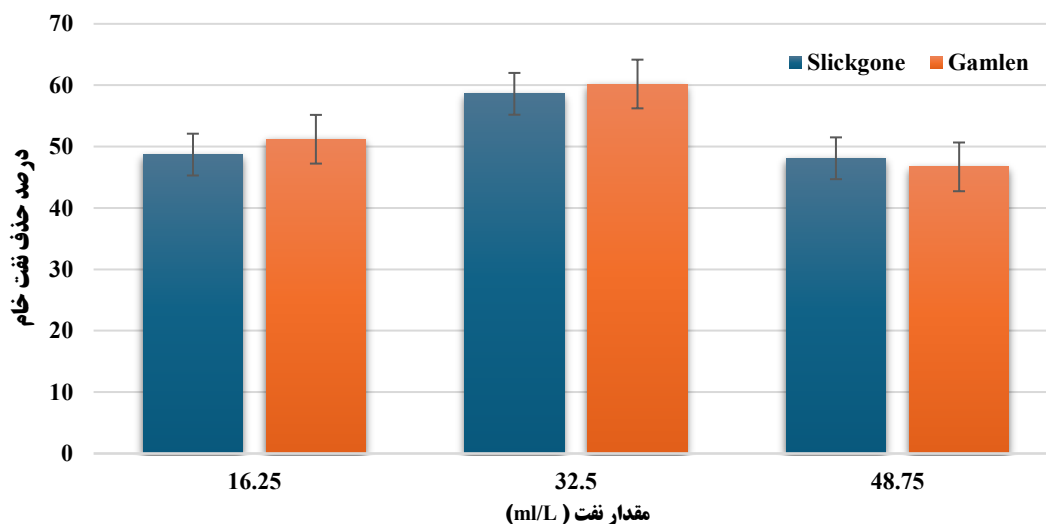
نتایج مربوط به تغییرات درصد حذف نفت خام توسط *Chlorella vulgaris* در غلظت‌های مختلف اولیه نفت در شکل مربوطه ارائه شده است. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، میانگین حذف نفت در غلظت‌های ۱۶/۲۵، ۳۲/۵۰ و ۴۸/۷۵ (ml/L) به‌ترتیب ۵۶/۱۳، ۵۷/۴۳ و ۵۰/۸۷ درصد محاسبه شد. بیشترین مقدار حذف در غلظت ۳۲/۵۰ مشاهده گردید، در حالی که با افزایش غلظت نفت به ۴۸/۷۵ میزان حذف کاهش یافت. همچنین مقدار انحراف معیار در غلظت ۳۲/۵۰ نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود که بیانگر تغییرپذیری بالاتر داده‌ها در این سطح غلظتی است (شکل ۱).



شکل ۱. میانگین و انحراف معیار درصد حذف نفت خام توسط *Chlorella vulgaris* در سه سطح غلظت اولیه

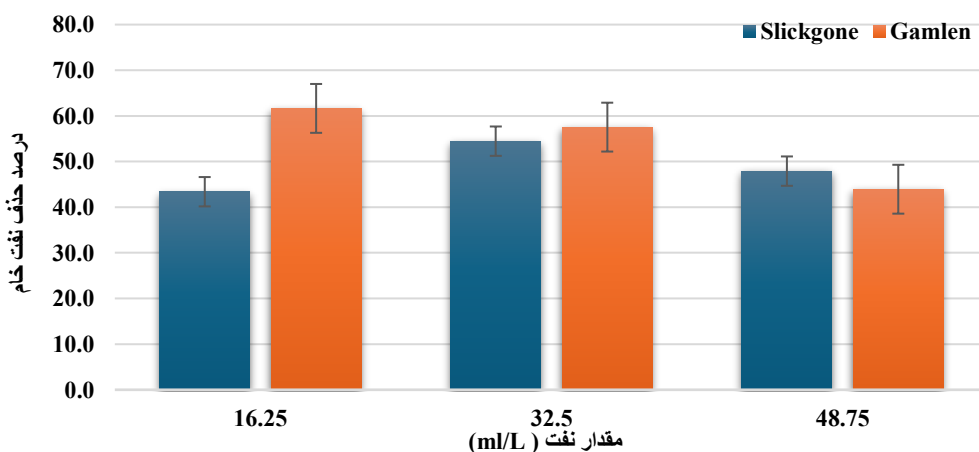
نفت

نتایج حاصل از زیست‌پالایی نفت خام به‌رگان توسط جلبک *Chlorella vulgaris* در حضور دو پراکنده‌ساز شیمیایی و در شرایط pH=7 (خنثی) در شکل ۲ ارائه شده است. ارزیابی عملکرد این دو پراکنده‌ساز در شش تیمار آزمایشی نشان داد که از نظر آماری تفاوت معناداری میان کارایی آن‌ها در حذف نفت مشاهده نشد. این موضوع نشان می‌دهد که هر دو پراکنده‌ساز از نظر توانایی اولیه در برهم زدن لایه نفتی و افزایش قابلیت دسترسی زیستی هیدروکربن‌ها، در این سیستم زیستی-شیمیایی عملکردی مشابه دارند. با این وجود، بررسی روند کلی داده‌ها نشان داد که با افزایش غلظت اولیه نفت خام، کارایی سیستم زیست‌پالایی شامل جلبک *Chlorella vulgaris* و پراکنده‌ساز کاهش می‌یابد. این کاهش کارایی در غلظت‌های بالاتر نفت احتمالاً ناشی از محدودیت ظرفیت متابولیکی جلبک برای تجزیه ترکیبات هیدروکربنی و همچنین اثرات بازدارنده یا سمی برخی ترکیبات نفتی بر فعالیت‌های زیستی میکروارگانیسم‌ها است. در میان تیمارهای مورد بررسی، بیشترین میزان حذف نفت و بهترین عملکرد سیستم در غلظت ۳۲/۵ ml/L مشاهده شد که بیانگر مناسب‌تر بودن غلظت‌های متوسط آلاینده برای انجام مؤثر فرآیند زیست‌پالایی است. از دیدگاه مکانیسم عملکرد، استفاده از پراکنده‌سازها در سطح لایه نفتی موجب کاهش کشش سطحی در مرز مشترک آب و نفت می‌شود. کاهش کشش سطحی سبب شکسته شدن لایه نفتی به قطرات بسیار ریز و تشکیل امولسیون نفت در آب می‌گردد. این پدیده باعث افزایش سطح تماس نفت با محیط آبی و در نتیجه افزایش دسترسی میکروارگانیسم‌ها به ترکیبات هیدروکربنی می‌شود. علاوه بر این، پراکنده‌سازها با جلوگیری از تجمع مجدد قطرات نفتی، پایداری امولسیون را افزایش داده و شرایط مناسب‌تری را برای مصرف ترکیبات نفتی به‌عنوان منبع کربن و انرژی توسط میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کنند. در نتیجه، این فرآیند می‌تواند موجب تسریع و بهبود کارایی زیست‌پالایی نفت در محیط‌های آبی شود.



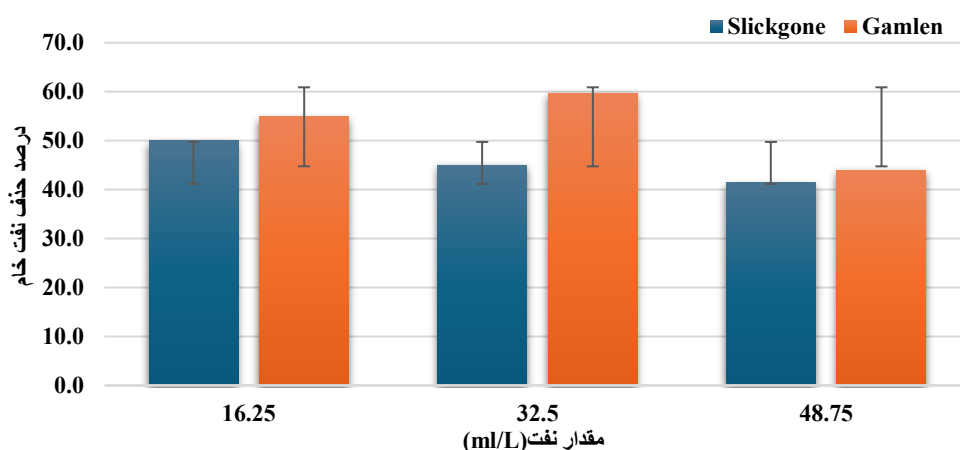
شکل ۲. مقایسه زیست‌پالایی نفت خام توسط کلرلا ولگاریس در مجاورت دو پراکنده‌ساز اسلیک‌گان و گملن OD4000

نتایج حاصل از بررسی اثر غلظت آلاینده بر فرآیند زیست‌پالایی در $pH=5$ (شکل ۳) نشان داد که نوع پراکنده‌ساز و غلظت نفت خام، تأثیر متقابلی بر راندمان حذف دارند. بر اساس یافته‌ها، بیشترین میزان حذف نفت در این مرحله مربوط به تیمار حاوی پراکنده‌ساز گملن در پایین‌ترین غلظت نفتی ۱۶/۲۵ (ml/L) به میزان ۶۱/۶ درصد بود. با این حال، با افزایش غلظت نفت خام، راندمان حذف در حضور پراکنده‌ساز گملن با شیئی ملایم کاهش یافت و در غلظت ۴۸/۷۵ (ml/L) به حداقل مقدار خود یعنی ۴۴/۱ درصد رسید. در مقابل، پراکنده‌ساز اسلیک‌گان رفتار متفاوتی را نشان داد؛ به طوری که با افزایش اولیه غلظت نفت از ۱۶/۲۵ به ۳۲/۵ (ml/L)، راندمان حذف از ۴۳/۴ درصد به ۵۴/۵ درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده کارایی بهتر این پراکنده‌ساز در غلظت‌های متوسط آلاینده در شرایط اسیدی است. با این حال، در غلظت نهایی ۴۸/۷۵ (ml/L)، کارایی هر دو پراکنده‌ساز کاهش یافت که می‌تواند ناشی از اشباع ظرفیت زیستی جلبک یا اثرات سمی ناشی از تجمع هیدروکربن‌ها باشد. مقایسه کلی نتایج در این pH نشان می‌دهد که اگرچه گملن در غلظت‌های پایین برتری محسوسی دارد، اما اسلیک‌گان در غلظت‌های بالاتر ۴۸/۷۵ (ml/L) پایداری عملکرد بیشتری از خود نشان داده و راندمان حذف بالاتری را نسبت به گملن ثبت کرده است.



شکل ۳. مقایسه زیست‌پالایی نفت خام توسط کلرلا ولگاریس در مجاورت دو پراکنده‌ساز اسلیک‌گان و گملن OD4000 ($pH=5$)

نتایج زیست‌پالایی نفت خام بهرگان در حضور جلبک *Chlorella vulgaris* و دو پراکنده‌ساز در $\text{pH} = 9$ در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس داده‌ها، عملکرد دو پراکنده‌ساز در این شرایط قلیایی متفاوت بود. در تیمار حاوی اسلیک‌گان، با افزایش غلظت نفت از ۱۶/۲۵ به ۴۸/۷۵ (ml/L)، راندمان حذف روندی کاهشی نشان داد. در مقابل، در تیمار حاوی گملن، راندمان حذف تا غلظت ۳۲/۵ (ml/L) افزایش یافت و سپس در غلظت ۴۸/۷۵ (ml/L) کاهش پیدا کرد. بیشترین راندمان حذف در $\text{pH} = 9$ مربوط به تیمار گملن در غلظت ۳۲/۵ (ml/L) و در حدود ۶۰ درصد بود. همچنین، در تمامی غلظت‌های مورد بررسی، گملن نسبت به اسلیک‌گان راندمان بالاتری در حذف هیدروکربن‌های نفتی نشان داد.



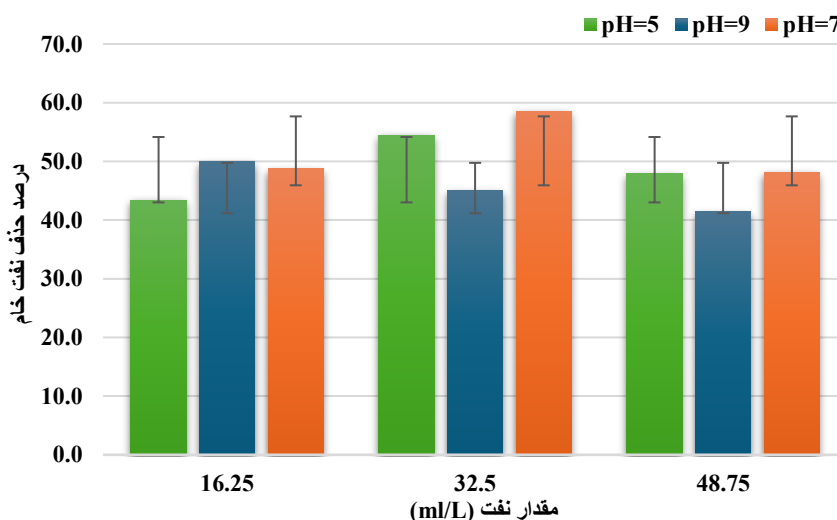
شکل ۴. مقایسه زیست‌پالایی نفت خام توسط (*Chlorella vulgaris*) در مجاورت دو پراکنده‌ساز اسلیک‌گان و گملن $\text{pH} = 9$ در $\text{OD}4000$

مقایسه عملکرد دو پراکنده‌ساز اسلیک‌گان و گملن در حذف نفت خام توسط *Chlorella vulgaris* در سه pH مختلف (۵، ۷ و ۹) نشان داد که هر دو پراکنده‌ساز تحت تأثیر شرایط pH و غلظت نفت قرار دارند، اما الگوی تغییرات راندمان در آنها متفاوت است (شکل‌های ۵ و ۶).

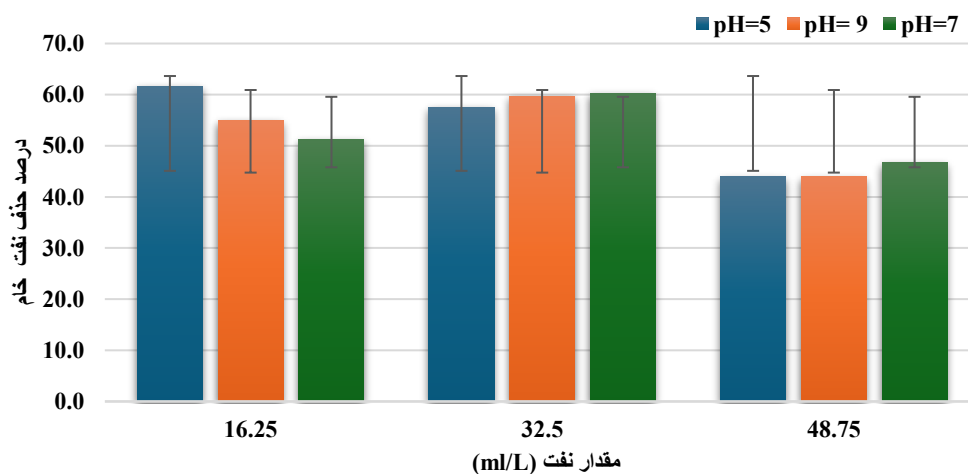
در حضور پراکنده‌ساز اسلیک‌گان، بیشترین درصد حذف نفت در $\text{pH} = 7$ مشاهده شد، به طوری که در غلظت ۳۲/۵ (ml/L)، راندمان حذف به حدود ۵۸ تا ۵۹ درصد رسید. در $\text{pH} = 5$ مقدار حذف اندکی کمتر و در $\text{pH} = 9$ کمترین میزان راندمان ثبت گردید. به طور کلی، در هر سه pH ، با افزایش غلظت نفت از ۱۶/۲۵ به ۴۸/۷۵ (ml/L)، درصد حذف کاهش یافت و شرایط نزدیک به خنثی بیشترین کارایی اسلیک‌گان را فراهم نمود.

در مقابل، پراکنده‌ساز گملن $\text{OD}4000$ در گستره وسیع‌تری از pH ها عملکرد بالایی از خود نشان داد. در غلظت پایین نفت ۱۶/۲۵ (ml/L) بیشترین حذف در $\text{pH} = 5$ (حدود ۶۱-۶۲ درصد) ثبت شد، در حالی که در غلظت متوسط ۳۲/۵ (ml/L)، راندمان حذف در $\text{pH} = 7$ و در $\text{pH} = 9$ تقریباً مشابه و در حدود ۵۹-۶۰ درصد بود. در غلظت بالای نفت ۴۸/۷۵ (ml/L) نیز بهترین عملکرد مربوط به $\text{pH} = 7$ بود. هرچند با افزایش غلظت نفت راندمان حذف در هر سه pH کاهش یافت، اما گملن در مقایسه با اسلیک‌گان پایداری بیشتری در برابر تغییر pH نشان داد. به طور کلی، نتایج نشان دادند که غلظت متوسط نفت ۳۲/۵ (ml/L) در هر دو پراکنده‌ساز منجر به بیشترین راندمان حذف می‌شود و افزایش غلظت نفت به ۴۸/۷۵ (ml/L) کاهش معنی‌داری در حذف ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، در $\text{pH} = 7$ به عنوان نقطه بهینه مشترک برای هر دو پراکنده‌ساز شناخته شد، هرچند گملن $\text{OD}4000$ در pH های اسیدی و قلیایی نیز بازده قابل توجهی داشت. در مجموعه، می‌توان گفت گملن به دلیل

پایداری عملکرد در شرایط گوناگون pH، گزینه مؤثرتری برای زیست‌پالایی نفت در محیط‌های با نوسانات pH به شمار می‌رود، در حالی که اسلیک‌گان بیشترین کارایی خود را در pH نزدیک به خنثی نشان می‌دهد.



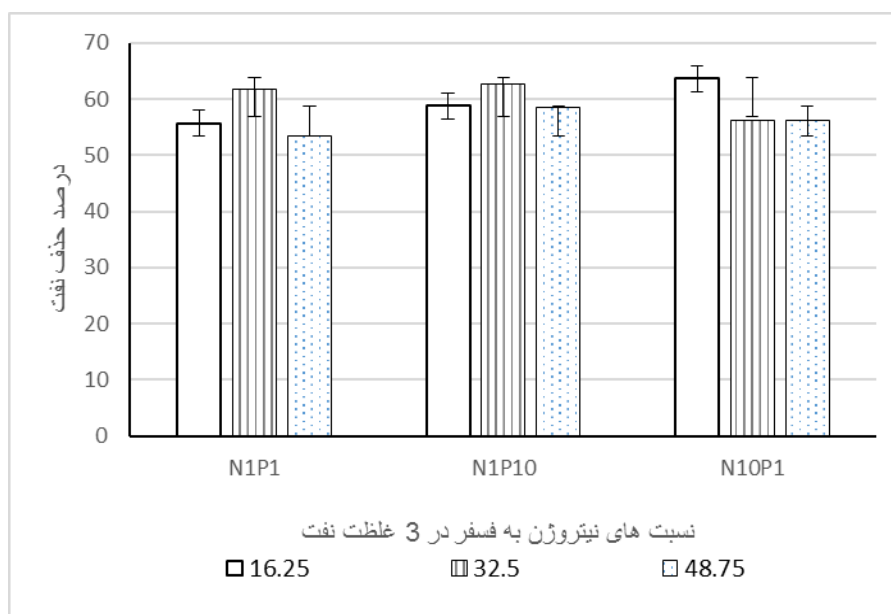
شکل ۵. مقایسه زیست‌پالایی نفت خام توسط کلرلا ولگاریس در مجاورت پراکنده ساز اسلیک‌گان در pH های (۵-۷-۹)



شکل ۶. مقایسه زیست‌پالایی نفت خام توسط کلرلا ولگاریس در مجاورت پراکنده ساز گلمن OD4000 در pH های (۵-۷-۹)

نتایج مقایسه درصد حذف نفت در سه غلظت نفت با نسبت‌های مختلف نیتروژن و فسفر در شکل ۷ ارائه شد. در مقایسه بین سه غلظت مختلف نفت خام، بیشترین درصد حذف نفت توسط جلبک کلرلا ولگاریس در نسبت نیتروژن به فسفر (N:P) برابر با ۱:۱۰ مشاهده گردید، به طوری که درصد حذف نفت به ترتیب از کمترین تا بیشترین غلظت برابر با ۵۸/۸ درصد، ۶۲/۸ درصد و ۵۶/۶ درصد بود. این روند نشان می‌دهد که نسبت بهینه‌ی عناصر غذایی، به‌ویژه فسفر، نقش قابل توجهی در بهبود عملکرد زیستی جلبک در حذف ترکیبات نفتی دارد. در غلظت ۲۵/۱۶ میلی لیتر، با افزایش نسبت فسفر به نیتروژن، میزان حذف نفت از ۵۵/۷ درصد به ۵۸/۸ درصد افزایش یافت و همچنین با افزایش نیتروژن نیز درصد حذف به ۶۳/۷ درصد رسید. این امر بیانگر آن است که هر دو عنصر نیتروژن و فسفر به‌عنوان عناصر کلیدی در متابولیسم جلبک، در فعال‌سازی مسیرهای آنزیمی مرتبط با تجزیه هیدروکربن‌ها مؤثرند. حضور کافی فسفر موجب تحریک سنتز نوکلئوتیدها و فسفولیپیدها می‌شود که در رشد سلولی و ترمیم غشای سلول نقش دارند، درحالی‌که نیتروژن کافی باعث افزایش سنتز پروتئین‌ها و آنزیم‌های دخیل در اکسیداسیون ترکیبات آلی می‌گردد. در غلظت ۳۲/۵ (ml/L)، با وجود افزایش نیتروژن اضافی، درصد حذف نفت به ۵۶/۳ درصد کاهش یافت. این کاهش می‌تواند ناشی از اثر بازدارنده‌ی غلظت بالای نیتروژن

باشد که منجر به برهم‌خوردن تعادل متابولیسی سلول و کاهش بیان آنزیم‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن‌ها می‌شود. به بیان دیگر، نیتروژن بیش از حد ممکن است سبب انتقال متابولیسم جلبک از مسیرهای کاتابولیسی به مسیرهای رشد سریع سلولی گردد، که در نتیجه توان حذف نفت کاهش می‌یابد. در غلظت ۴۸/۷۵ (ml/L)، افزودن نیتروژن موجب افزایش میزان حذف از ۵۳/۴ درصد به ۵۶/۳ درصد گردید و افزودن فسفر سبب ارتقاء بیشتر حذف تا ۵۸/۶ درصد شد. این نتایج نشان می‌دهد که حضور فسفر نسبت به نیتروژن اثر مثبت قوی‌تری در کارایی حذف نفت دارد، احتمالاً به دلیل نقش آن در انرژی‌زایی (از طریق ATP) و در مسیرهای زیست‌تجزیه‌ای وابسته به فسفریلاسیون می‌باشد. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که تنظیم بهینه‌ی نسبت عناصر نیتروژن و فسفر در محیط کشت جلبک کلرلا و لگاریس، می‌تواند به‌طور معناداری بر کارایی زیست‌تجزیه نفت خام تأثیر بگذارد. نسبت‌های متعادل‌تر به‌ویژه (N:P = 1:10) موجب تقویت رشد سلولی هم‌زمان با افزایش فعالیت آنزیم‌های نفت‌تجزیه‌کننده می‌شوند، در حالی که نسبت‌های بسیار بالای نیتروژن ممکن است اثر مهاری بر فرآیند تجزیه داشته باشند.



شکل ۷. مقایسه درصد حذف نفت توسط کلرلا و لگاریس با نسبت های مختلف نیتروژن و فسفر

نتایج تحلیل واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که مدل ارزیابی‌شده با ضریب تبیین $R^2 = 0.812$ و ضریب تبیین تعدیل‌شده 0.724 از برازش مناسبی برخوردار بوده و قادر است بخش عمده‌ای از تغییرات راندمان حذف نفت خام را توضیح دهد. بررسی اثرات اصلی متغیرها بیانگر آن است که نوع پراکنده‌ساز ($F = 21.044, P < 0.01$) و غلظت نفت ($F = 36.479, P < 0.01$) در سطح اطمینان ۹۹ درصد، و متغیر pH ($P = 0.047$) در سطح اطمینان ۹۵ درصد تأثیر معنی‌داری بر راندمان حذف دارند. افزون بر این، معنی‌دار شدن تمامی اثرات متقابل دو جانبه شامل $pH \times$ نوع پراکنده‌ساز ($P = 0.036$)، $pH \times$ غلظت نفت ($P = 0.048$) و نوع پراکنده‌ساز \times غلظت نفت ($P = 0.001$)، در کنار معنی‌داری اثر متقابل سه‌جانبه $pH \times$ نوع پراکنده‌ساز \times غلظت نفت ($P = 0.002$)، نشان‌دهنده پیچیدگی و چندعاملی بودن این فرآیند است؛ به این معنا که تأثیر هر متغیر به شدت وابسته به سطوح سایر متغیرها بوده و برای دستیابی به بالاترین راندمان حذف، تنظیم و بهینه‌سازی هم‌زمان هر سه عامل ضروری است.

جدول ۲. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) اثرات عوامل مستقل بر راندمان حذف نفت خام

منبع تغییرات	درجه آزادی (df)	مجموع مجذورات (SS)	میانگین مجذورات (MS)	آماره F	سطح معنی‌داری (P-value)
pH	۲	۹۳/۳۸۸	۴۶/۶۹۴	۳/۳۲۱	*./۰.۴۷
نوع پراکنده‌ساز (Dispersant)	۱	۲۹۵/۸۷۰	۲۹۵/۸۷۰	۲۱/۰۴۴	**./۰.۰۱ >
غلظت نفت (Concentration)	۲	۱۰۲۵/۷۶۴	۵۱۲/۸۲۲	۳۶/۴۷۹	**./۰.۰۱ >
pH × نوع پراکنده‌ساز	۲	۱۰۳/۰۱۱	۵۱/۵۰۶	۳/۶۶۳	*./۰.۳۶
pH × غلظت نفت	۴	۱۴۹/۴۹۱	۳۷/۳۷۳	۲/۶۵۸	*./۰.۴۸
نوع پراکنده‌ساز × غلظت نفت	۲	۲۲۶/۲۰۰۱	۱۱۳/۰۰۱	۸/۰۳۷	**./۰.۰۱
pH × نوع پراکنده‌ساز × غلظت	۴	۲۹۷/۷۲۱	۷۴/۴۳۰	۵/۲۹۴	**./۰.۰۲
خطا (Error)	۳۶	۵۰۶/۱۷۴	۱۴/۰۶	—	—
مجموع کل اصلاح شده	۵۳	۲۶۹۷/۳۹۳	—	—	—

$R^2 = ۰/۷۲۴$ (ضریب تبیین)، $R^2 = ۰/۸۱۲$ (ضریب تبیین تعدیل شده)، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($P \leq 0.05$). ** معنی‌دار در سطح ۱ درصد ($P \leq 0.01$).

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تجزیه زیستی نفت خام به‌رگان توسط *Chlorella vulgaris* در حضور دو پراکنده‌ساز شیمیایی اسلیک‌گان و گملن، تحت شرایط مختلف pH و نسبت‌های متفاوت عناصر مغذی بررسی شد. نتایج نشان داد که در pH خنثی، بین عملکرد دو پراکنده‌ساز از نظر حذف نفت اختلاف آماری معناداری وجود نداشت. این یافته نشان می‌دهد که هر دو پراکنده‌ساز در این شرایط توان مشابهی در افزایش دسترس‌پذیری زیستی نفت برای جلبک دارند. به نظر می‌رسد این اثر عمدتاً ناشی از کاهش کشش سطحی، تشکیل قطرات ریز نفت و افزایش سطح تماس بین آلاینده و فاز آبی باشد؛ فرایندی که دسترسی جلبک به هیدروکربن‌ها را تسهیل می‌کند. این نتیجه با گزارش Ghazaryan و همکاران (۲۰۲۳) هم‌خوان است که نشان دادند پراکنده‌سازها می‌توانند سرعت تجزیه زیستی هیدروکربن‌ها را افزایش دهند.

در مقابل، افزایش غلظت اولیه نفت خام موجب کاهش کارایی سامانه شد. این کاهش احتمالاً به اثرات مهارتی هیدروکربن‌ها بر فعالیت متابولیکی *C. vulgaris* مربوط است. غلظت‌های بالاتر نفت می‌تواند با ایجاد تنش اکسیداتیو، آسیب به غشاهای سلولی و اختلال در فعالیت‌های آنزیمی و فتوسنتزی، توان زیستی جلبک را محدود کنند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که افزایش غلظت نفت معمولاً با کاهش رشد و کارایی تجزیه زیستی همراه است (Sharma et al., 2015; Parab et al., 2008). بنابراین، در pH خنثی به نظر می‌رسد شدت آلودگی عامل تعیین‌کننده‌تری نسبت به نوع پراکنده‌ساز باشد.

با تغییر pH، رفتار دو پراکنده‌ساز از یکدیگر متمایز شد. در pH برابر با ۵، گملن در تمام سطوح غلظت نفت عملکرد بهتری نسبت به اسلیک‌گان نشان داد. این برتری احتمالاً به پایداری بیشتر امولسیون نفت در آب و حفظ کارایی پراکنده‌سازی در شرایط اسیدی مربوط است. در چنین شرایطی، افزایش سطح تماس بین نفت و جلبک می‌تواند دسترسی زیستی هیدروکربن‌ها را بهبود دهد و در نتیجه راندمان تجزیه زیستی را افزایش دهد. در مقابل، در pH برابر با ۹، تغییر بار سطحی ترکیبات فعال در پراکنده‌سازها و نیز سطح سلول‌های جلبک می‌تواند بر پایداری امولسیون و نوع برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی اثر بگذارد (Mohan et al., 2023). این تغییرات احتمالاً علت تفاوت عملکرد تیمارها در محیط

قلیایی است. در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که pH یکی از عوامل کلیدی در تعیین کارایی پراکنده‌ساز و در نهایت راندمان بیورمدیشن است.

علاوه بر pH، نسبت عناصر مغذی نیز نقش مهمی در کارایی این فرایند داشت. در این پژوهش، نسبت N:P برابر با ۱:۱۰ بیشترین درصد حذف نفت را ایجاد کرد. این نتیجه نشان می‌دهد که فراهم بودن فسفر کافی، در کنار مقدار مناسب نیتروژن، می‌تواند شرایط مطلوب‌تری برای فعالیت متابولیکی جلبک فراهم کند. فسفر در سنتز نوکلئوتیدها، فسفولیپیدها و انتقال انرژی نقش اساسی دارد، در حالی که نیتروژن برای ساخت پروتئین‌ها و آنزیم‌های دخیل در تجزیه هیدروکربن‌ها ضروری است. در مقابل، افزایش بیش از حد نیتروژن ممکن است تعادل متابولیکی سلول را برهم زند و بازده فرایند را کاهش دهد. این برداشت با نتایج گزارش شده توسط [Sathishkumar](#) و [همکاران \(۲۰۲۲\)](#) نیز هم‌سو است.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نفت خام می‌تواند اثرات مهاری قابل توجهی بر عملکرد فیزیولوژیک ریزجلبک‌ها، به‌ویژه رشد و فتوسنتز، داشته باشد. برای مثال، گزارش شده است که مواجهه با نفت می‌تواند در مدت کوتاه موجب کاهش معنی‌دار فعالیت فتوسنتزی شود، هرچند این اثر لزوماً با کاهش فوری بقای سلولی همراه نیست ([Carrera Martínez et al., 2010](#)). همچنین شدت این اثر به غلظت نفت وابسته است؛ به طوری که غلظت‌های پایین‌تر در برخی موارد اثر مهاری کمتری دارند، اما غلظت‌های بالاتر معمولاً باعث کاهش رشد و فعالیت فتوسنتزی می‌شوند ([Parab et al., 2008](#)). یافته‌های پژوهش حاضر نیز این الگو را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که کاهش راندمان تجزیه زیستی در غلظت‌های بالاتر نفت، به احتمال زیاد ناشی از اختلال در فرایندهای متابولیکی و فتوسنتزی *C. vulgaris* است.

با وجود این، نتایج این مطالعه نشان داد که حضور پراکنده‌سازها می‌تواند تا حدی این اثرات منفی را تعدیل کند. هر دو پراکنده‌ساز با افزایش پراکنش نفت و بهبود دسترس‌پذیری زیستی هیدروکربن‌ها، شرایط مناسب‌تری برای فعالیت جلبک فراهم کردند. در عین حال، تفاوت عملکرد آن‌ها در pHهای مختلف نشان داد که کارایی پراکنده‌سازها وابسته به شرایط محیطی است و نمی‌توان برای همه شرایط، یک ترکیب را به‌عنوان گزینه برتر معرفی کرد. این نکته از نظر طراحی سامانه‌های زیست‌پالایی اهمیت دارد، زیرا انتخاب پراکنده‌ساز باید متناسب با شرایط شیمیایی محیط انجام شود.

در کنار نقش پراکنده‌سازها، نتایج این پژوهش بار دیگر توان بالقوه *Chlorella vulgaris* را در تجزیه آلاینده‌های نفتی نشان داد. مطالعات آزمایشگاهی متعددی گزارش کرده‌اند که این جلبک می‌تواند بخش قابل توجهی از هیدروکربن‌های نفتی را در شرایط کنترل‌شده حذف کند و در عین حال فعالیت زیستی خود را حفظ نماید ([El Sheekh et al., 2013](#); [Chinwe, 2024](#), [Amber et al., 2014](#)). برخی پژوهش‌ها نیز کاهش pH، افزایش جذب نوری و افت غلظت نفت باقی‌مانده را به‌عنوان نشانه‌هایی از فعالیت متابولیکی این گونه در حضور نفت معرفی کرده‌اند. یافته‌های پژوهش حاضر با این گزارش‌ها هم‌خوان است و نشان می‌دهد که *C. vulgaris* حتی در حضور نفت خام و پراکنده‌سازها نیز توان مشارکت مؤثر در فرایند تجزیه زیستی را دارد، هرچند میزان این کارایی به شرایط محیطی وابسته است.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که کارایی تجزیه زیستی نفت خام توسط *Chlorella vulgaris* حاصل برهم‌کنش چند عامل اصلی، شامل pH، غلظت اولیه نفت، نوع پراکنده‌ساز و نسبت عناصر مغذی است. در pH خنثی، تفاوت معناداری بین دو پراکنده‌ساز مشاهده نشد، اما در شرایط اسیدی گملن عملکرد بهتری داشت. همچنین افزایش غلظت نفت موجب کاهش راندمان حذف شد، در حالی که نسبت N:P برابر با ۱:۱۰ مناسب‌ترین شرایط تغذیه‌ای را برای فرایند فراهم کرد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هم‌زمان شرایط محیطی و تغذیه‌ای می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش کارایی سامانه‌های زیست‌پالایی مبتنی بر ریزجلبک‌ها داشته باشد.

نتایج این پژوهش نشان داد که *Chlorella vulgaris* توانایی مؤثری در تجزیه نفت خام به‌رگان دارد و استفاده از پراکنده‌سازها می‌تواند این فرایند را بهبود دهد. در pH خنثی، عملکرد دو پراکنده‌ساز تفاوت معناداری نداشت، اما در محیط اسیدی Gamlen کارایی بالاتری نشان داد. همچنین نسبت N:P برابر ۱:۱۰ شرایط بهینه‌تری برای افزایش راندمان حذف نفت فراهم کرد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هم‌زمان pH، نوع پراکنده‌ساز و نسبت عناصر مغذی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش کارایی زیست‌پالایی داشته باشد. با این حال، این مطالعه در

مقیاس آزمایشگاهی انجام شده و اثرات بلندمدت پراکنده‌سازها بر سایر اجزای اکوسیستم آبی بررسی نشده است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده: (۱) سمیت زیست‌محیطی پراکنده‌سازها در شرایط واقعی ارزیابی شود؛ (۲) از کنسرسیون‌های جلبکی-باکتریایی استفاده شود؛ (۳) پراکنده‌سازهای زیست‌سازگار متناسب با شرایط خلیج فارس بررسی شوند؛ (۴) کارایی سیستم در مقیاس نیمه‌صنعتی آزمایش گردد.

References

۱. امتیازجو، م. سلیمی، ل. زینلی، م. شهابی، ب. قاسم پور ملکی، م. ۱۳۹۴. ارتباط بین در معرض گذاری آزمایشگاهی به نفت خام و پاسخ های آنتی اکسیدانی بارناکل های *Tetraclita rufotincta*. مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره هفدهم شماره یک، بهار ۱۳۹۴
۲. شهابی، ب.، ساداتی پور، س.م.ت.، حاتمی، ا. ۱۳۸۸. بررسی و اندازه گیری کل هیدروکربنهای نفتی (TPH) در آب و رسوب خلیج فارس در محدوده بهرگان. پژوهش های علوم و فنون دریایی، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۴۵-۵۸.
۳. شمسی زاده، ع. ۱۳۹۱. ارزیابی مقایسه ای فلزات سنگین نیکل، وانادیوم و سرب در میگو *litopaeneus vanammei* در مجاورت نفت و پراکنده سازهای نفتی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال. دانشکده علوم و فنون دریایی
۴. غفاری، ر. سلطانی، ن. مظاهری اسدی، م. ۱۳۹۳. پتانسیل کاهش آلودگی نفت خام توسط جلبک کلرلا ولگاریس و پاسخ های فیزیولوژیک ناشی از آن. مجله بوم شناسی آبزیان، دوره ۴، شماره ۲، صفحه ۱۲-۱۸.
5. Amaral E A., Bertoldo L., Bender C, Rizzetti T M, de Cassia R., de Souza S. Removal of organic contaminants in water bodies or wastewater by microalgae of the genus Chlorella: A review. (2023). *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100476. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100476>
6. Amber L. Garr ,Susan Laramore .,William Krebs. 2014. Toxic Effects of Oil and Dispersant on Marine Microalgae. *Bull Environ Contam Toxicol* , 93:654-659
7. Bordbar, L., Emtiazjoo, M., Farkhani, D. 2008. Comparison and influence of two newly produced Iranian oil dispersants (Pars1 & Pars2) with the Gamlen OD4000 on rainbow trout. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*. 2008 Dec;43(14):1598-601.
8. Baglieri, A., Sidella, S., Barone, V., Fragalà, F., Silkina, A., Nègre, M., & Gennari, M., 2016. Cultivating *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda* microalgae to degrade inorganic compounds and pesticides in water. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-10.
9. Botero Ñañez K., Daniela K., Ramirez R, Cordeiro de Oliveira O M., Reyes C Y ., Thiago I., Moreira A. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from produced water using the microalgae *Chlorella vulgaris* cultivated in mixotrophic and heterotrophic conditions. *Chemosphere*, 356, 141931). (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141931>
10. Carrera-Martínez, D., Mateos-Sanz, A., López-Rodas, V., Costas, E. (2010) Microalgae response to petroleum spill: An experimental model analyzing physiological and genetic response of *Dunaliella tertiolecta* (Chlorophyceae) to oil samples from the tanker Prestige. *Aquatic Toxicology* 97, 151-159
11. Chinwe A.J. 2024. Phycoremediation Potentials of *Chlorella vulgaris* in Degradation of Crude Oil Spill, *Glob Acad J Agri Biosci*; Vol-6, Iss- 6 pp- 226-231. <https://doi.org/10.36348/gajab.2024.v06i06.006>
12. Doe J, Khan N, Al-Harbi F, Patel R. 2024. Evaluation of the phytoremediation potential of free-floating aquatic plants for degradation of oil pollution. *Sustainability (MDPI)*. 16(21):9288. Available from: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/21/9288>
13. El-Sheekh, M.M., Hamouda, R.A., Nizam, A.A. 2013. Biodegradation of crude oil by *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris* growing under heterotrophic conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 82: 67-72.

14. Flayyih, A. H., & Al Magdamy, B. A. 2025. Phytoremediation of petroleum hydrocarbon by micro green algae: A review. *Journal of Biotechnology Research Center*, 18(2), 134-144. <https://doi.org/10.24126/jobrc.2024.18.2.805>
15. Ghazaryan, L., Bagranyan, K., & Petrosyan, V. 2023. Surfactant-enhanced bioremediation of crude oil using microalgae: Mechanistic insights. *Science of the Total Environment*, 869, 162788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162788>
16. Hamouda, R. A., Alhumairi, A. M., & Saddiq, A. A. 2023. Simultaneous bioremediation of petroleum hydrocarbons and production of biofuels by the micro-green alga, cyanobacteria, and its consortium. *Heliyon*, 9(6), e16656. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16656>
17. Hunt, L.J., Duca, D., Dan, T., Knopper, L.D., Petroleum hydrocarbon (PHC) uptake in plants: A literature review, *Environmental Pollution* (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.012>.
18. khtar S, Andersen MS, Liu Y, Gomes J. Phytoremediation of contaminated water using aquatic plants: recent advances, mechanisms, and challenges. *Sci Total Environ*. 2023; 880:163473. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468584423000119>
19. Mohan, S., Kavitha, S., & Selvam, A. 2023. Influence of pH and dispersant type on microalgal degradation of hydrocarbons. *Processes*, 11(2), 442. <https://doi.org/10.3390/pr11020442>
20. Olukunle, O. F. (2013). Characterization of indigenous microorganisms associated with crude oil-polluted soil and water using traditional techniques. *Microbiology Journal*, 3(1), 1-11.
21. Onuorah, S., Okafor, G., & Nwankwo, J. (2019). Bioremediation of Crude and Refined Oil-Polluted Fresh Water Using *Chlorella vulgaris* Isolated from a Pond. *Universal Journal of Public Health*, 8(1), 23-34, 2020. doi: 10.13189/ujph.2020.080103
22. Parab, S.R., Pandit, R.A., Kadam, A.N., Indap, M.M. (2008) Effect of Bombay high crude oil and its water- soluble fraction on growth and metabolism of diatom *Thalassiosira* sp. *Indian Journal of Marine Sciences*. 37(3), 251-155.
23. Pisal, A. .2011. Determination of Oil and Grease in Water with a Mid-Infrared Spectrometer. PerkinElmer, Inc. Shelton, CT 06484 USA. www.perkinelmer.com
24. Patel R. 2019. Phytoremediation Using Aquatic Plants. In: *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*. Springer;. p. 33-60. Available from https://www.researchgate.net/publication/340047038_Phytoremediation_Using_Aquatic_Plants
25. Radice R.P., , De Fabrizio V, Donadoni A, Scopa A, and Martelli G. 2023. Crude Oil Bioremediation: From Bacteria to Microalgae. *Bacteria to Microalgae. Processes* ,11, 442. <https://doi.org/10.3390/pr11020442>
26. Sharma, S., Kansal, A., & Tyagi, V. 2015. Effect of crude oil concentration on microalgal bioremediation efficiency. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(12), 9502-9513. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4310-7>
27. Singh R, Kumar P, Verma S. 2019. Potential of *Lemna minor* for removal of petroleum hydrocarbons from contaminated water. *Chemosphere*. 237:124451. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519302413>
28. Sheikh Abdullah S R., Al-Baldawi AI., Almansoori AF., Purwanti I F, Al-Sbani Siti Shilatul N H., Sharuddin N .2020. Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities. *Chemosphere* 247 , 125932

29. **Smith A, Lee B. 2022.** Phytoremediation of pollutants from wastewater: a concise review. *Environ Sci Pollut Res.* 29(21):31765-31782. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9102307/>
30. **Sathishkumar, P., Doble, M., & Chatterjee, S. 2022.** Role of nutrient optimization in microalgal bioremediation of petroleum hydrocarbons. *Microorganisms*, 10(5), 905. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050905>
31. **Song Z, Liu M, Bao B, Guo J, Tao H, Zhu B, and Chen Q. 2022.** Effects of *Chlorella vulgaris* Enhancement on Endogenous Microbial Degradation of Marine Oil Spills and Community Diversity. *Microorganisms* 2022, 10, 905. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050905>
32. **Ugboma, C. J., Nrior, R. R., & Igbudu, M. E. 2023.** Bioremediation potential of algae (*Chlorella vulgaris*) in crude oil contaminated sediment. *South Asian Journal of Research in Microbiology*, 15(3), 30–46. <https://doi.org/10.9734/sajrm/2023/v15i3289>
33. **Vaičiulytė, S., Padovani, G., Kostkevičienė, J., Carlozzi, P. 2014.** Batch Growth of *Chlorella Vulgaris* CCLA 896 versus Semi-Continuous Regimen for Enhancing Oil-Rich Biomass Productivity. *Energies*, Vol. 7, 3840-3857.
34. **Xaaldi Kalhor, A., Mohammadi Nassab, A.D., Abedi, E., Bahrami, A., Movafeghi, A., 2016.** Biodiesel production in crude oil contaminated environment using *Chlorella vulgaris*. *Bioresour. Technol.* 222, 190–194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09>.
35. **Zhao, S., Liu, M., Bao, B., Guo, J., Tao, H., Zhu, B., & Chen, Q. 2022.** Effects of *Chlorella vulgaris* enhancement on endogenous microbial degradation of marine oil spills and community diversity. *Microorganisms*, 10(5), 905. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050905>