نقش واهمیت میکروارگانیسم‌ها در زیست‌پالایی و تجزیه آلودگی‌های نفتی

افشین محمودزاده[۱]، آرزو نیک پی[۲].

۱- گروه زیست شناسی ، دانشکده علوم و فناوری های نوین ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن
n.mahmoodzadeh@iau.ac.ir

۲- گروه میکروبیولوژی ، دانشکده علوم پایه ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس
arezoo.nikpay@iau.ir

خلاصه:

آلودگی نفتی در محیط های آبی، یکی از بحران‌های جدی زیست محیطی در سطح جهانی است که پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت انسان، اکوسیستم‌های طبیعی و اقتصادهای ساحلی دارد. نفت پس از ورود به محیط‌های آبی تحت شرایط فیزیکی و شیمیایی مانند دما، شوری و جریان‌های آب تغییرات پیچیده‌ای را تجربه می‌کند که ماندگاری آن را افزایش داده و پاکسازی را دشوارتر می‌سازد. نشت نفت ناشی از فعالیت‌های صنعتی، حمل‌ونقل و شهرنشینی موجب کاهش تنوع زیستی، مرگ‌ومیر گسترده پرندگان دریایی، تخریب خاک و کاهش زیست‌توده گیاهان می‌شود و چرخه‌های غذایی و منابع شیلاتی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. . تمرکز اصلی این پژوهش بر بررسی نقش میکروارگانیسم‌ها در تجزیه نفت و ظرفیت آن‌ها برای توسعه فناوری‌های نوین پاکسازی زیست‌محیطی است. این مطالعه بر پایه مرور مقالات علمی ، گزارش های زیست محیطی و داده های آماری بین المللی درسال های اخیر، مورد بررسی قرار گرفته است . زیست‌پالایی به‌عنوان روشی دوستدار محیط زیست و کم‌هزینه مطرح شده است که با بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌ها، قارچها و آنزیمی ها به تجزیه، سم‌زدایی آلاینده‌ها می‌پردازد. باکتری‌هایی مانند *Pseudomonas* و *Bacillus* با تولید بیوسورفکتانت‌ها و آنزیم‌های متنوع توانایی بالایی در تجزیه هیدروکربن‌های نفتی دارند، در حالی که قارچهایی نظیر *Aspergillus* و *Fusarium* با ترشح آنزیم‌های لیگنینولیتیک خارج سلولی نقش مهمی در تخریب ترکیبات پیچیده نفتی ایفا می‌کنند. همچنین وجود ریزجلبک ها که یک گزینه ایده‌آل برای زیست‌پالایی نفت خام هستند. زیست‌پالایی رویکردی مؤثر برای کاهش اثرات آلودگی نفتی و بازگرداندن محیط‌های آلوده به شرایط پایدار است.

کلمات کلیدی: آلودگی نفتی ، نشت نفت ، زیست‌پالایی ، ریزجلبک ، قارچهای تجزیه‌کننده ، بیوسورفکتانت‌ها ، میکروارگانیسم ها.

۱. مقدمه

دریاها و آبراه‌ها به عنوان زیستگاه‌های گسترده برای گونه‌های متنوعی از موجودات عمل می‌کنند، که بخش عمده‌ای از سطح کره زمین را پوشانده‌اند. علی‌رغم نقش حیاتی نفت و گاز طبیعی در تأمین انرژی جهانی ، فعالیت‌های انسانی منجر به تخلیه حجم قابل توجهی از آلاینده‌ها به این محیط‌ها شده و در نتیجه اختلالات جدی در اکوسیستم‌های آبی و دریایی را رقم زده است.[۱]آلودگی نفتی در اکوسیستم‌های آبی، به عنوان یکی از حادترین تهدیدات زیست‌محیطی تلقی می‌شود که منشأ اصلی آن فعالیت‌های صنعتی و روند رو به رشد شهرنشینی است. پیامدهای نشت نفت شامل خسارات فوری نظیر آلودگی سطح وسیع آب و تلفات گسترده موجودات آبزی است.

افزایش مستمر تقاضای جهانی برای نفت، ریسک‌های مرتبط با استخراج، ترانزیت و مصرف این ماده را تشدید کرده و احتمال وقوع رخدادهای انتشار تصادفی را بالا می‌برد؛ چنین انتشاری، در صورت عدم وقوع رقیق‌سازی مؤثر یا تجزیه زیستی/شیمیایی، می‌تواند پیامدهای مخرب زیست‌محیطی بلندمدتی به دنبال داشته باشد. آلودگی منابع آبی به عنوان یک بحران جهانی شناخته می‌شود که نه تنها سلامت انسان را از طریق افزایش شیوع بیماری‌های گوارشی، اختلالات تنفسی و پتانسیل کارسینوژنی(سرطان‌زایی) تهدید می‌کند، بلکه منجر به بی‌ثباتی اکوسیستم‌های طبیعی و تخریب زیستگاه‌های حیات وحش می‌گردد. ورود مستمر آلاینده‌ها به محیط‌های آبی، یکی از عوامل کاهش تنوع زیستی و ایجاد خطر جدی برای بقای ارگانیسم‌های دریایی است .[۵]

روش‌های متداول فیزیکی و شیمیایی برای پاکسازی این آلاینده‌ها، به دلیل هزینه‌های سنگین، راندمان محدود و اثرات جانبی بر اکوسیستم، پاسخگوی نیازهای کنونی نیستند.میکروارگانیسم‌ها به عنوان عناصر کلیدی در چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، با توانایی تجزیه و تبدیل ترکیبات آلی پیچیده،برای مدیریت آلودگی‌های نفتی و بازگرداندن تعادل اکولوژیکی ارائه می‌دهند. توانایی آن‌ها در تجزیه هیدروکربن‌های نفتی، زیست‌پالایی را به رویکردی اقتصادی، سازگار با محیط زیست و قابل اعتماد تبدیل کرده است. علاوه بر این، استفاده از میکروارگانیسم‌ها نه تنها به کاهش آلودگی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان ابزاری برای پایش زیستی و بازگرداندن سلامت اکوسیستم‌ها نیز مورد بهره‌برداری قرار گیرد.[۱۹]

۲. آلودگی نفتی :

بر اساس داده‌های سال ۲۰۲۴، شش مورد نشت عمده (بیش از ۷۰۰ هزار کیلوگرم) و چهار مورد نشت متوسط (۷ تا ۷۰۰ هزار کیلوگرم) از نفتکش‌ها ثبت شده است. این رخدادها که عمدتاً شامل نفت کوره بوده‌اند، در اروپا، آسیا، آمریکای شمالی و جنوبی گزارش شده و نشان‌دهنده ماهیت جهانی آلودگی نفتی هستند. برآوردها حجم کل نفت رهاشده را حدود ۱۰۰۰۰۰ هزار کیلوگرم اعلام کرده‌اند؛ رقمی که میانگین سالانه نشت‌های بیش از ۷ هزار کیلوگرم را به ۷.۴ مورد رسانده است. این روند گرچه نسبت به دهه‌های پیشین کاهش یافته، اما همچنان تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی محسوب می‌شود.این پراکندگی جغرافیایی نشان می‌دهد که آلودگی نفتی یک مشکل جهانی است و محدود به منطقه خاصی نمی‌شود.[۱۵]

آلودگی نفتی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدها برای محیط‌زیست، ارتباط مستقیم با آلودگی منابع آب دارد. نشت نفت در مراحل استخراج، پالایش و حمل‌ونقل، سبب نفوذ ترکیبات هیدروکربنی به خاک و در نهایت آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. این آلودگی نه تنها کیفیت شیمیایی آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه ویژگی‌های فیزیکی خاک را نیز دگرگون می‌سازد. یکی از تغییرات کلیدی، کاهش ترشوندگی(یک پدیده فیزیکی جذاب است که تمایل یک مایع برای پخش شدن روی یک سطح جامد را توصیف میکند) خاک است؛ به‌گونه‌ای که در حضور آلاینده‌های

نفتی، حرکت آب در منافذ مویرگی خاک به‌شدت محدود می‌گردد. با افزایش غلظت آلودگی، ظرفیت خاک برای جذب و انتقال آب کاهش یافته و نفوذ آب به لایه‌های زیرین دشوارتر می‌شود. این فرآیند چرخه طبیعی آب را مختل کرده، کارایی خاک در ذخیره و جابجایی آب را کاهش می‌دهد و در نهایت کیفیت و پایداری منابع آب زیرزمینی را به‌طور جدی تهدید می‌کند.[۵] جوامع میکروبی خاک به‌عنوان شاخص‌های زیستی حساس، به سرعت تحت تأثیر آلودگی نفتی قرار گرفته و کاهش تنوع و عملکرد اکوسیستم را نشان می‌دهند. [۱۲]خاک‌های آلوده با کاهش حاصلخیزی، کمبود نیتروژن و فسفر، افزایش شوری و فشردگی، و نسبت نامتعادل کربن به نیتروژن مواجه می‌شوند؛ عواملی که چرخه‌های زیستی و فعالیت آنزیم‌های خاک را مختل می‌سازند. [۱۴] همچنین حضور مایعات سبک غیرآبی (LNAPL) در آب‌های زیرزمینی، خطر مهاجرت ترکیبات نفتی به مناطق غیر اشباع و آلودگی گسترده منابع آب را افزایش می‌دهد. [۱۳]

۳. اثرات و عوامل آلودگی نفتی در اکوسیستم :

در آب‌های آزاد، آلودگی نفتی به‌عنوان یک بحران جهانی شناخته می‌شود که پیامدهای جدی برای سلامت انسان، حیات آبزیان و اقتصادهای ساحلی دارد. افزایش فعالیت‌های صنعتی و تقاضای انرژی، احتمال نشت نفت را بیشتر کرده و خسارت‌های سنگینی به تنوع زیستی و چرخه‌های طبیعی وارد می‌سازد. این آلودگی نه تنها زندگی موجودات دریایی را مختل می‌کند، بلکه جوامع انسانی وابسته به منابع آب پاک برای آشامیدن، ماهیگیری و نیازهای روزمره را نیز تحت فشار قرار می‌دهد. [۵]

هنگامی که نفت وارد اقیانوس می‌شود، تحت تأثیر شرایط محیطی مانند دما، باد، جریان‌های آب و میزان شوری، تغییرات شیمیایی و فیزیکی متعددی را تجربه می‌کند. این تغییرات نحوه پراکندگی نفت در سطح آب و میزان اثرگذاری آن بر موجودات دریایی و سواحل را تعیین می‌کنند. نفت تازه ترکیبی از هیدروکربن‌های متنوع با وزن‌های مولکولی مختلف است: اجزای سبک‌تر و محلول‌تر سریع‌تر در سطح آب پخش می‌شوند و دامنه آلودگی را گسترش می‌دهند، در حالی که بخش‌های سنگین‌تر با گذشت زمان غلیظ‌تر و پایدارتر می‌شوند. این ویژگی‌ها پاکسازی را دشوارتر کرده و اثرات زیست‌محیطی طولانی‌تر و شدیدتری به دنبال دارند.ماهیت غیرقطبی نفت و نیروهای بین‌مولکولی (آبگریزی و واندروالس) مانع از انحلال آن در آب می‌شوند. در نتیجه، نفت عمدتاً به صورت لایه یا قطرات مجزا باقی می‌ماند. تشکیل امولسیون‌های نفت و آب تنها در شرایط خاص رخ می‌دهد و این امولسیون‌ها از نظر ترمودینامیکی ناپایدار بوده و تمایل به جداسازی دارند، مگر آنکه عوامل امولسیون‌کننده در سطح مشترک حضور داشته باشند. [۵]

آلودگی نفتی می‌تواند هم از فعالیت‌های انسانی و هم از فرآیندهای طبیعی سرچشمه بگیرد. منابع اصلی آن شامل تخلیه نفت از پالایشگاه‌ها و مخازن ذخیره، رهاسازی آب توازن کشتی‌ها، نشت چاه‌های نفتی، شکستگی خطوط لوله، پساب‌های شهری و صنعتی و همچنین رسوبات جوی است. افزون بر این، فعالیت‌هایی مانند اکتشاف، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی نفت در دریا، همراه با حوادث ناگوار دریایی، اغلب منجر به نشت نفت می‌شوند و نفت خام را به یکی از آلاینده‌های اصلی منابع آبی و دریایی بدل می‌سازند. حتی جاده‌ها نیز به‌عنوان منابع مهم آلودگی عمل کرده و با ورود نفت خام به آب‌ها، اثرات منفی بیشتری بر اکوسیستم‌های آبی و دریایی برجای می‌گذارند. گستردگی این آلودگی نشان می‌دهد که نظارت دقیق و اجرای اقدامات مؤثر برای کاهش پیامدهای آن بر خاک، منابع آبی و اکوسیستم‌های دریایی کاملاً ضروری است. [۱،۵]

۴. منابع آلودگی، پایداری آلاینده‌ها و ضرورت مدیریت :

در مناطق صنعتی و ساحلی (پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، خلیج‌ها)، آلودگی نفتی به‌دلیل حوادث، نشت‌ها و عملیات جاری رخ می‌دهد و مقادیر قابل‌توجهی نفت و مشتقات آن را وارد خاک و آب می‌کند. به‌خاطر سمیت بالا و پایداری شیمیایی، آلاینده‌های نفتی به نگرانی جهانی بدل شده‌اند. منابع شامل نشت‌های تصادفی، فعالیت‌های صنعتی و دفع نامناسب پسماندهای نفتی است که به اختلال اکوسیستم‌ها، آلودگی آب‌ها، افت بهره‌وری کشاورزی و آسیب انسانی می‌انجامد. هیدروکربن‌های نفتی در خاک، رسوبات، آب‌های سطحی و زیرزمینی، به‌واسطه تجمع‌زیستی و دوام بالا، کیفیت آب آشامیدنی و حاصلخیزی خاک را کاهش داده و زنجیره غذایی را متاثر می‌کنند؛ بنابراین مدیریت و پالایش این آلودگی‌ها یک ضرورت زیست‌محیطی است. [۱۳،۱۴،۱۸]

آلودگی نفتی می‌تواند از مسیرهای گوناگون وارد محیط‌های آبی شود که به طور کلی در دو گروه اصلی جای می‌گیرند: منابع طبیعی و منابع مصنوعی. در بخش طبیعی، نشت نفت از مخازن زیرزمینی و رخدادهای زمین‌شناسی مانند فعالیت‌های آتشفشانی در اعماق اقیانوس‌ها نقش دارند. در مقابل، منابع مصنوعی طیف وسیعی از فعالیت‌های انسانی را شامل می‌شوند؛ از جمله حوادث و تصادفات نفتکش‌ها، فرآیندهای حمل‌ونقل و جابه‌جایی نفت، عملیات پالایشگاهی، استخراج نفت از چاه‌ها و همچنین بارگیری و تخلیه نفت در بنادر. در واقع، سهم اصلی و غالب آلودگی نفتی دریاها ناشی از همین فعالیت‌های انسانی است، زیرا حجم و گستره انتشار نفت خام در این مسیرها بسیار بیشتر از نشت‌های طبیعی بوده و پیامدهای زیست‌محیطی شدیدتری به دنبال دارد. افزون بر این، آلودگی‌های مصنوعی به دلیل تکرارپذیری و گستردگی جغرافیایی، تهدیدی پایدار برای اکوسیستم‌های دریایی محسوب می‌شوند و می‌توانند چرخه‌های زیستی، کیفیت آب و حیات آبزیان را به طور جدی مختل کنند. [۲۲]

۵.اثرات نشت نفت بر پرندگان دریایی :

نشت نفت ، پرندگان دریایی را دچار مرگ‌ومیر می‌کند؛ نفت با تخریب ساختار پر، خاصیت ضدآب و عایق حرارتی را از بین می‌برد و توان شناوری، پرواز و شیرجه را مختل می‌کند. تماس مستقیم می‌تواند به خفگی فوری منجر شود و کاهش ذخایر انرژی، هیپوترمی و ضعف شدید را در پی دارد. بلعیدن نفت هنگام آراستن یا تغذیه، پرندگان را در معرض PAHs قرار می‌دهد که می‌توانند تا حدود ۳۰٪ از هیدروکربن‌های نفتی را تشکیل دهند و اثرات سمی جدی ایجاد کنند.

پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که ترکیبات شیمیایی پایدار نظیر هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک (PAHs) و گروهی از ترکیبات هالوژنه شامل بی‌فنیل‌های پلی‌کلرینه (PCBs)، دی‌اکسین‌ها و آفت‌کش‌های ارگانوکلرین، با مداخله در فرآیندهای سنتز، ترشح و انتقال هورمون‌های تیروئید، موجب برهم خوردن هموستاز این هورمون‌ها در پرندگان می‌شوند. چنین اختلالاتی اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا هورمون‌های تیروئید در تنظیم رشد، متابولیسم و توانایی پرندگان برای سازگاری با تغییرات محیطی نقش اساسی ایفا می‌کنند و هرگونه بی‌نظمی در عملکرد آن‌ها می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی و فیزیولوژیک گسترده‌ای به همراه داشته باشد. [۳]

۶.اثرات نشت نفت بر گیاهان و خاک :

آلودگی نفتی خاک، دسترسی گیاهان به آب و مواد مغذی را مختل می‌کند، فشردگی خاک را افزایش می‌دهد و به کاهش زیست‌توده و تغییرات آشکار در ساختار برگ و ریشه منجر می‌شود. شدت و نوع سمیت به ویژگی‌های خاک و گونه‌های گیاهی وابسته است. [۴]

نشانه‌های رایج در گیاهان آلوده شامل تخریب کلروفیل، تغییر عملکرد روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و تنفس، افزایش هورمون‌های تنش، تجمع مواد سمی در بافت‌ها و کاهش اندازه و بیوماس است. در این میان، گیاه‌پالایی به‌عنوان روشی نوین مطرح شده که با استفاده از گیاهان می‌تواند آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی را تجزیه کرده و حاصلخیزی و کیفیت خاک را بهبود بخشد. انتخاب گونه‌های مقاوم و ارزیابی توانایی آنها در تجزیه هیدروکربن‌ها نخستین گام در اجرای موفق این فناوری به‌ویژه در مناطق گرمسیری است. [۲۰]

جدول ۱ـ مقایسه سه نوع خاک در برابر آلودگی آب [۲۱]

نوع خاک	ویژگی اصلی	اثرآلودگی نفتی بر PH	اثربر CEC	اثربرظرفیت نگهداری آب	میزان مقاومت کلی
پودزولیک	اسیدی،موادآلی کم	تغییرات شدید(کاهش یا نوسان زیاد)	کاهش محسوس	کاهش ظرفیت نگهداری آب	آسیب پذیر
سدگلی	رس و مواد آلی بالا	تغییرات کم	حفظ یا کاهش جزئی	حفظ بهترآب و مواد مغذی	مقاوم
آبرفتی	حاصلخیز،بافت متنوع	تغییرات کم	تغییرات کم	کاهش محسوس در نگهداری آب	متوسط

با توجه به جدول شماره ۱خاک‌های پودزولیک، به دلیل ماهیت اسیدی و محتوای اندک مواد آلی، بیشترین حساسیت را نسبت به آلودگی نفتی نشان می‌دهند. در این خاک‌ها تغییرات چشمگیری در ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و pH مشاهده می‌شود که منجر به کاهش توانایی خاک در نگهداری مواد مغذی و آب می‌گردد. در مقابل، خاک‌های سدگلی با دارا بودن درصد بالای رس و مواد آلی، مقاومت بیشتری در برابر تخریب ناشی از آلودگی نفتی دارند و توانایی بالاتری در حفظ رطوبت و عناصر غذایی از خود نشان می‌دهند. خاک‌های آبرفتی نیز که معمولاً حاصلخیزتر هستند، تحت تأثیر آلودگی نفتی کاهش محسوسی در ظرفیت نگهداری آب را تجربه می‌کنند، هرچند تغییرات قابل توجهی در pH و CEC آن‌ها گزارش نشده است.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که خاک‌هایی با محتوای بالای مواد آلی و ذرات رس، به دلیل ظرفیت بیشتر در نگهداری آب و یون‌های غذایی، مقاومت بالاتری در برابر اثرات تخریبی آلودگی نفتی دارند. در مقابل، خاک‌های فقیر از نظر مواد آلی

و بافت سبک‌تر، مانند خاک‌های پودزولیک و شنی، به دلیل ظرفیت محدود در تبادل کاتیونی و حساسیت بیشتر به تغییرات pH، آسیب‌پذیری بالاتری در برابر آلودگی‌های نفتی نشان می‌دهند.[۲۱]

۷.پیامدهای اکولوژیک، اقتصادی و انسانی نشت نفت :

نفت با ورود به آب‌ها جمعیت ماهی‌ها را کاهش می‌دهد و اکوسیستم‌های آبی را مختل می‌کند؛ آثار مستقیم آن بر ماهی‌ها، پستانداران و پرندگان، و آلودگی منابع آب، به سلامت انسان (مثل مشکلات پوستی) نیز سرایت می‌کند. در اقتصاد، ضربه به شیلات و معیشت ساحلی جدی است. اثرات بلندمدت، زنجیره‌های غذایی و زیستگاه‌ها را برهم می‌زند و ضرورت مقررات سخت‌گیرانه و اقدامات پیشگیرانه را برجسته می‌کند. [۵]

زنوبیوتیک‌ها و ترکیبات مقاوم زیست‌تخریب‌ناپذیر مانند فلزات سنگین، بی‌فنیل‌های پلی‌کلرینه، پلاستیک‌ها و سموم کشاورزی، به دلیل سمیت بالا و ماندگاری طولانی، از مهم‌ترین تهدیدها برای سلامت انسان و محیط زیست به شمار می‌روند. [۲]

۸. روش های مختلف زیست‌پالایی:

زیست‌پالایی به‌عنوان یک روش مؤثر و پیشرفته برای پاکسازی محیط‌های آلوده مطرح است که بر پایه فرآیندهای طبیعی بیولوژیکی عمل می‌کند. در این فرآیند از میکروارگانیسم‌های مختلف چه هوازی و چه بی‌هوازی همچنین قارچ‌ها، گیاهان یا آنزیم‌های آن‌ها استفاده می‌شود تا آلاینده‌ها حذف، تخریب، سم‌زدایی یا بی‌حرکت شوند و در نهایت به اشکال کمتر سمی تبدیل گردند. موجودات زنده‌ای که این فرآیند را انجام می‌دهند، زیست‌پالایی‌کننده‌ها (bioremediators) نام دارند. نمونه‌هایی از فناوری‌های زیست‌پالایی شامل تهویه زیستی، زمین‌پروری، بیوراکتور، کمپوست‌سازی، زیست‌افزایی، ریزوفیلتراسیون و محرک زیستی هستند. با این حال، همه آلاینده‌ها به راحتی حذف نمی‌شوند؛ فلزات سنگین مانند کادمیوم و سرب به سختی جذب می‌شوند و جیوه حتی می‌تواند مشکلات بیشتری در زنجیره غذایی ایجاد کند.هدف نهایی زیست‌پالایی کاهش خطرات ناشی از آلاینده‌ها و بازگرداندن تعادل به محیط زیست است [۲،۷]

جدول۲ـ انواع روش های زیست پالایی [۲،۷]

درجا (In situ):	خارج از محل (Ex situ):
تصفیه در همان محل آلودگی.	انتقال مواد آلوده به مکان دیگر برای پاکسازی.

درجدول شماره ۲ روش درجا عملیات پاکسازی در همان محیط آلوده صورت می‌گیرد. این رویکرد معمولاً هزینه کمتر و مداخله مستقیم‌تری دارد، اما به‌شدت وابسته به شرایط طبیعی محیط است.و در روش خارج از محل آلاینده‌ها از محل

اصلی برداشت، حفاری و به یک مرکز تخصصی منتقل می‌شوند. این شیوه امکان کنترل بهتر شرایط تصفیه را فراهم می‌سازد، اما معمولاً پرهزینه‌تر و زمان‌برتر است.به‌طور کلی، انتخاب میان روش‌های درجا و خارج از محل نیازمند بررسی دقیق عوامل محدودکننده و ویژگی‌های محیطی است. درجا بودن یا نبودن آلاینده‌ها، میزان دسترسی به منابع، و قابلیت‌های فنی موجود، همگی در تعیین رویکرد نهایی نقش دارند. بنابراین، هر پروژه پاکسازی باید با توجه به شرایط خاص محل و نوع آلاینده‌ها طراحی شود تا کارایی و پایداری فرآیند تصفیه بیولوژیکی تضمین گردد.

زیست‌پالایی روشی مؤثر، دوستدار محیط زیست و کم‌هزینه است. میکروب‌ها نسبت به گیاهان گزینه‌ی مناسب‌تری محسوب می‌شوند زیرا سریع‌تر رشد می‌کنند و دستکاری آن‌ها آسان‌تر است. علاوه بر تجزیه آلاینده‌ها، میکروارگانیسم‌ها قادرند فلزات سنگین را کاهش دهند و حاصلخیزی خاک را بهبود بخشند. ویژگی مهم دیگر، توانایی رشد در شرایط بسیار متغیراست که آن‌ها را به گزینه‌ای پایدار برای مقابله با ترکیبات خطرناک و جریان‌های زباله تبدیل می‌کند.

عوامل مؤثر بر زیست‌پالایی شامل شرایط فیزیکی و شیمیایی محیط، نوع خاک، منابع کربن و نیتروژن، و نوع میکروارگانیسم‌ها (تک‌گونه یا کنسرسیوم چندگانه) است. کربن به‌عنوان اصلی‌ترین ماده مغذی برای رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها شناخته می‌شود و توانایی استفاده از منابع متنوع کربنی امکان حذف آلاینده‌ها در شرایط مختلف را فراهم می‌سازد. [۲،۶]

۹.زیست‌پالایی هوازی:

زیست‌پالایی هوازی یکی از مهم‌ترین رویکردهای پاکسازی محیط‌های آلوده است که در آن میکروارگانیسم‌ها با استفاده از اکسیژن ترکیبات پیچیده را تجزیه می‌کنند. گونه‌های باکتری هوازی مانند *Bacillus*، *Pseudomonas*، *Sphingomonas*، *Flavobacterium*، *Nocardia*، *Rhodococcus* و *Mycobacterium* توانایی بالایی در تجزیه آلاینده‌های آلی دارند.این باکتری‌ها قادرند آفت‌کش‌ها، هیدروکربن‌های آلکانی و ترکیبات پلی‌آروماتیک را تجزیه کرده و حتی آن‌ها را به‌عنوان منبع کربن و انرژی برای رشد خود استفاده کنند. این ویژگی باعث می‌شود زیست‌پالایی هوازی یک فرآیند کارآمد و پایدار برای کاهش آلودگی‌های محیطی باشد.توانایی تجزیه طیف وسیعی از آلاینده‌ها، استفاده از آلاینده‌ها به‌عنوان منبع انرژی، و پایداری فرآیند.اما اکسیژن عامل محدودکننده است؛ در شرایط کم‌اکسیژن سرعت تجزیه کاهش می‌یابد. مدیریت میزان اکسیژن در محیط آلوده برای موفقیت حیاتی است. [۲]

۱۰.زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت :

زیست‌پالایی یکی از روش‌های پذیرفته‌شده برای تصفیه خاک‌های آلوده به هیدروکربن است. این فرآیند با استفاده از فلور میکروبی بومی انجام می‌شود و هدف آن بازگرداندن خاک به شرایط نزدیک به پیش از آلودگی نفتی است. میکروارگانیسم‌ها با تجزیه ترکیبات نفتی، ساختار شیمیایی خاک را تغییر داده و میزان سمیت زیستی را کاهش می‌دهند.این فرآیند پیچیده و چندمرحله‌ای است و نیازمند همکاری بین گونه‌های مختلف میکروبی است؛ هر گروه بخشی از مسیر تجزیه را انجام می‌دهد و در تعامل با سایر گونه‌ها، تجزیه کامل هیدروکربن‌ها امکان‌پذیر می‌شود. عوامل محیطی مانند دما، غلظت

مواد مغذی و شرایط فیزیکی خاک یا آب نقش اساسی در موفقیت دارند. مدیریت این شرایط برای دستیابی به کارایی بالاتر ضروری است. [۱۷،۱۴]

۱۱.زیست‌پالایی در محیط‌های آبی :

در محیط‌های آبی آلوده، همکاری چندگانه بین گروه‌های زیستی مانند فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها نقش مهمی در تجزیه هیدروکربن‌ها دارد. این موجودات تجمعاتی تشکیل می‌دهند که در بستر دریا ته‌نشین می‌شوند. تجمعات ناشی از انعقاد فیتوپلانکتون‌ها قطرات نفت خام را در خود جای داده و به رسوب در بستر منجر می‌شوند. این فرآیند باعث کاهش آلودگی سطحی و انتقال آلاینده‌ها به لایه‌های عمیق‌تر می‌شود. [۱۷]

۱۲.ترکیب و ماهیت نفت خام:

نفت خام مجموعه‌ای پیچیده از هیدروکربن‌هاست که به‌طور طبیعی در مخازن زیرزمینی به شکل مایع وجود دارد و پس از استخراج و جداسازی سطحی، در فشار اتمسفر حالت مایع خود را حفظ می‌کند. این ترکیب شامل سه گروه اصلی است:

- آلکان‌ها (پارافین‌ها): زنجیره‌های مستقیم یا شاخه‌دار.
- سیکلوآلکان‌ها (نفتن‌ها): ترکیبات حلقوی.
- ترکیبات حاوی نیتروژن، گوگرد و اکسیژن (NSOs): هرچند در مقادیر کمتر، اما با اهمیت بالا.

این مولکول‌ها می‌توانند به‌صورت منفرد یا همراه با زنجیره‌های جانبی آلکیل دیده شوند و همین تنوع، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نفت خام را تعیین می‌کند. نفت خام همچنین شامل هیدروکربن‌های آلیفاتیک مانند آلکان‌ها، آلکن‌ها و سیکلوآلکان‌ها، هیدروکربن‌های مونوآروماتیک نظیر زایلن‌ها، تولوئن، فنل، بنزن و اتیل‌بنزن، و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای مانند آنتراسن، فلورن و نفتالین است. این ترکیبات به دلیل پایداری و مقاومت شیمیایی، در محیط زیست به‌سختی تجزیه می‌شوند و اثرات زیان‌باری بر موجودات زنده و سلامت انسان دارند [۱۳،۵].

۱۳.هیدروکربن‌های نفتی :

هیدروکربن‌های نفتی ترکیباتی پیچیده با وزن‌های مولکولی متفاوت هستند که می‌توانند خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر دهند. این تغییرات اثرات جبران‌ناپذیری بر پوشش گیاهی، حیات وحش و سلامت انسان دارند. اقدامات زیست‌پالایی با هدف تغییر ترکیب نفتی خاک انجام می‌شوند و این تغییرات به کاهش سمیت بیولوژیکی خاک منجر می‌گردند. [۱۴]

هیدروکربن‌های سبک مانند متان، اتان و پروپان در شرایط طبیعی به صورت گاز وجود دارند، در حالی که هیدروکربن‌های سنگین‌تر معمولاً در حالت مایع یا جامد یافت می‌شوند. این وضعیت بسته به ویژگی‌های هر میدان نفتی متفاوت است.

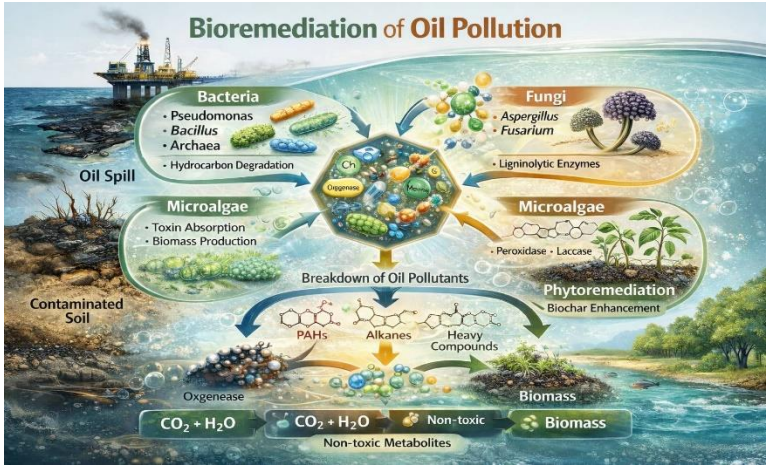
آلکان‌ها: ترکیبات خطی با کمتر از پنج اتم کربن در حالت گازی هستند، در حالی که آلکان‌هایی با بیش از پنج اتم کربن مانند هپتادکان ($C_{17}H_{36}$) در حالت مایع وجود دارند.

سیکلوآلکان‌ها: شامل سیکلوپنتان و سیکلوهگزان، و در موارد نادر سیکلوپروپان و سیکلوبوتان. همچنین نفت خام می‌تواند حاوی نفتن‌های چندحلقه‌ای مانند پرگنان و دینواستران باشد.

آروماتیک‌ها: ترکیبات BTEX (بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن) تا حدود ۶۰٪ از بخش سبک نفت را تشکیل می‌دهند و به دلیل سمیت بالا اهمیت ویژه‌ای دارند. در بخش‌های سنگین‌تر نفت، ترکیبات آروماتیک معمولاً دارای جایگزین‌های آلکیلی یا حلقه‌های سیکلوآلکان متصل هستند. علاوه بر این، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) مانند آنتراسن، فنانترن و پیرن در نفت خام یافت می‌شوند که به دو دسته رزین‌های محلول و آسفالتن‌های نامحلول تقسیم می‌شوند. تجزیه اجزای مختلف نفت خام بسته به نوع هیدروکربن‌ها نیازمند ژن‌های پلاسمیدی متفاوت است. برای مثال، در متابولیسم آلکان‌ها، م یکروارگانیسم‌های هوازی عمدتاً از مجموعه‌ای از آنزیم‌ها شامل مونواکسیژنازها، روبردوکسین و روبردوکسین ردوکتاز استفاده می‌کنند. این آنزیم‌ها آلکان‌ها را به الکل تبدیل می‌کنند و این فرآیند با افزایش بیان چندین ژن آلکالین همراه است. چنین سازوکارهای آنزیمی و ژنتیکی نشان‌دهنده پیچیدگی و کارآمدی سیستم‌های زیستی در تجزیه ترکیبات نفتی هستند. [۱۷] همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، تجزیه هیدروکربن‌های نفتی حاصل عملکرد هماهنگ باکتری‌ها، قارچ‌ها و ریزجلبک‌ها از طریق مسیرهای آنزیمی اختصاصی نظیر مونواکسیژنازها، دی‌اکسیژنازها و لاکازها بوده که در نهایت منجر به تبدیل آلاینده‌های پیچیده به متابولیت‌های کم‌خطر مانند CO_2 و H_2O می‌شود.

تعادل زیستی اکوسیستم‌ها به‌شدت به فعالیت میکروارگانیسم‌ها در زنجیره‌های تغذیه‌ای وابسته است. این موجودات با چرخش مواد و انرژی، تجزیه و تبدیل ترکیبات آلی و معدنی، عناصر حیاتی را به چرخه زیستی بازمی‌گردانند و از این طریق به پایداری و سلامت اکوسیستم‌ها کمک می‌کنند. این نقش بنیادین، زیست‌پالایی را ممکن و اثربخش می‌سازد، زیرا همان سازوکارهای طبیعی چرخه مواد برای پاکسازی آلاینده‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. [۲]

شکل ۱ـ نمای شماتیک مسیرهای مولکولی زیست‌پالایی هیدروکربن‌های نفتی توسط میکروارگانیسم‌ها (طراحی مفهومی نویسندگان با استفاده از ابزارهای گرافیکی).



۱۴.نقش قارچ‌ها در پالایش نفت و آلاینده‌های صنعتی :

پالایش زیستی نشت‌های نفتی توسط میکروارگانیسم‌ها روشی ارزان، ایمن و مؤثر است. گونه‌های قارچی مانند *Aspergillus niger*، *Penicillium documbens*، *Cochliobolus lutanus* و *Fusarium solani* توانایی بالایی در تجزیه نفت خام نشان داده‌اند. در عربستان سعودی نیز قارچ‌های *Candida*، *Cladosporium sphaerospermum*، *Eupenicillium hirayamae*، *Paecilomyces variotii*، *Aspergillus polyporicola*، *Aspergillus spelaeus*، *Fusarium oxysporum* و *Drechslera spicifera* از خاک‌های آلوده جداسازی و ظرفیت زیست‌پالایی آن‌ها تأیید شده است. [۱۰]

قارچ‌هایی مانند *Pestalotiopsis*، *Aspergillus*، *Mucor* و *Penicillium* با تولید آنزیم‌های خارج‌سلولی فعال، هیدروکربن‌ها را به‌طور جزئی تغییر می‌دهند، در حضور کربن کمکی به‌طور کامل تجزیه می‌کنند یا حتی آن‌ها را به‌عنوان تنها منبع کربن مصرف می‌نمایند. آنزیم‌های لکاز، پراکسیداز منگنز و پراکسیداز لیگنین در خاک‌های آلوده به آلکان‌های بلند و PAHs اغلب کارآمدتر از باکتری‌ها عمل می‌کنند. رشد هیف‌های رشته‌ای، سطح تماس با نفت را افزایش داده و دسترسی به آلاینده‌ها را تسهیل می‌کند.در شرایط بی‌هوازی به دلیل کمبود اکسیژن کارایی قارچ‌ها کاهش می‌یابد؛ راهکار عملی، استفاده از آنزیم‌های خارج‌سلولی به‌عنوان بیوکاتالیست برای تسهیل تجزیه نفت سنگین است. [۱۱]

در میان سه اقدام آزمایش‌شده، کاشت گیاهان مؤثرترین روش برای افزایش غنای میکروبی خاک بود؛ اما ترکیب همزمان کاشت گیاه، افزودن عامل میکروبی و بیوچار بیشترین افزایش در تنوع جامعه میکروبی را ایجاد کرد. این غنا و تنوع، مقاومت گیا هان را در برابر آلودگی نفتی افزایش داده و کارایی پالایش خاک آلوده را بهبود می‌دهد. در عین حال، ورود عوامل میکروبی خارجی می‌تواند پیامدهای اکولوژیکی پیش‌بینی‌نشده ایجاد کند؛ بنابراین باید به‌موازات کارایی پالایش، اثرات اکولوژیکی احتمالی نیز مدیریت شوند.

حضور شاخه *Firmicutes* در خاک‌های آلوده به نفت اهمیت ویژه‌ای دارد؛ این گروه توان تجزیه آلکان‌های نفتی، هیدروکربن‌های آروماتیک و ترکیبات مقاوم را داراست و به کاهش آلاینده‌های پایدار کمک می‌کند. در تیمارهای دارای عامل میکروبی، به‌ویژه همراه با گیاه یا بیوچار، فراوانی نسبی جنس *Bacillus* به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت که نشان‌دهنده کلونیزاسیون موفق باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت در این شرایط است. [۱۲]

۱۵.نقش باکتری‌ها و آرکی‌ها در بازیابی نفت :

نفت و اجزای آن میلیون‌ها سال در طبیعت حضور داشته‌اند؛ بنابراین موجوداتی تکامل یافته‌اند که از آن‌ها به‌عنوان منبع تغذیه و انرژی استفاده کنند. تاکنون حدود ۱۷۵ جنس باکتریایی، بسیاری از آرکی‌ها و برخی یوکاریوت‌های میکروبی شناسایی شده‌اند که توان رشد در حضور هیدروکربن‌ها دارند؛ این تنوع زیستی ظرفیت ذاتی طبیعت برای پاکسازی نفت را نشان می‌دهد. در مجاورت نشت‌های نفتی، جوامع بومی میکروبی به‌سرعت بیان ژن‌های تجزیه‌ای را افزایش می‌دهند؛ این تغییرات ژنتیکی تحرک باکتری‌ها، کموتاکسی به‌سوی منابع کربنی و فعالیت آنزیم‌های تجزیه ترکیبات آلیفاتیک را تقویت می‌کند. حتی جریان‌های طبیعی آب با فراهم‌کردن شرایط رشد، سرعت تجزیه هیدروکربن‌ها را بالا می‌برند.باکتری‌ها و آرکی‌ها با متابولیزه‌کردن ترکیبات کربنی و تولید بیوسورفکتانت‌ها ویژگی‌های فیزیکی–شیمیایی نفت را تغییر می‌دهند و

بازیابی نفت خام از دست‌رفته حین استخراج را تسهیل می‌کنند. بیوسورفکتانت‌ها با کاهش کشش سطحی و افزایش تحرک هیدروکربن‌ها، کارایی استخراج و پالایش زیستی را ارتقا می‌دهند. سویه‌های پرکاربرد شامل *Clostridium, Zymomonas, Klebsiella, Enterobacter and Methanobacterium archae* هستند که به‌واسطه تجزیه هیدروکربن‌ها و تولید محصولات جانبی مفید، در پروژه‌های زیست‌پالایی و بازیابی نفت به‌طور گسترده به‌کار می‌روند.

سویه‌های باکتریایی خاص قادرند بیش از ۶۶٪ هیدروکربن‌های اشباع و حدود ۶۳٪ هیدروکربن‌های آروماتیک را تجزیه کنند؛ به‌ویژه آلکان‌های زنجیره بلند C15–C35 و PAHs. برخی باکتری‌ها، قارچ‌ها و جلبک‌ها می‌توانند نفت سنگین لجن نفتی را به‌عنوان تنها منبع کربن مصرف کرده و نهایتاً آن را به دی‌اکسیدکربن و آب تبدیل کنند که معادل تجزیه کامل TPH است. از آنجا که نفت سنگین شامل آلکان‌های زنجیره‌بلند، PAHs، رزین‌ها و آسفالتین‌هاست، تجزیه آن به بیوسورفکتانت‌ها و همکاری چندآنزیمی نیاز دارد. [۹]

طی مطالعات متعدد، میکروارگانیسم‌هایی *مانند Achromobacter,Alkaligenes, Xanthobacter, Arthrobacter, Pseudomonas, Bacillus, Mycobacterium, Corynebacterium, Flavobacterium and Nitrosomonas* در زیست‌پالایی به‌کار گرفته شده‌اند؛ هر گروه با متابولیسم اختصاصی خود، بخش‌هایی از طیف آلاینده‌ها را هدف می‌گیرد و در کنار هم شبکه‌ای قدرتمند برای پاکسازی می‌سازند. [۲]

جنس‌های کلیدی شامل *Pseudomonas, Bacillus, Dietzia, Acinetobacter, Geobacillus and Rhodococcus*هستند.*Pseudomonas* و *Bacillus* بیوسورفکتانت‌هایی مانند لیپوپپتیدها و رامنولیپیدها تولید می‌کنند که با کاهش کشش سطحی، حلالیت و فراهمی زیستی هیدروکربن‌ها را افزایش می‌دهند. نمونه‌ی *Pseudomonas sp. WJ6* با تولید لیپوپپتیدها امولسیون‌سازی و شستشوی نفت را ممکن کرده و تجزیه آلکان‌های بلند و PAHs را تقویت می‌کند.

آنزیم‌ها: مونو/دی‌اکسیژنازها، دهیدروژنازها، ردوکتازها، سیتوکروم P450، پراکسیدازها و لاکازها مسیرهای اکسیداسیون و تبدیل هیدروکربن‌های پیچیده را پیش می‌برند. با وجود این ظرفیت بالا، سازگاری باکتری‌ها با شرایط متغیر محیط‌های آلوده دشوار است و حضور آلکان‌های بلند، PAHs، رزین‌ها و آسفالتین‌ها می‌تواند سرعت و کارایی پالایش میکروبی را محدود کند. [۹]

۱۶.عوامل مؤثر بر تجزیه نفت و شرایط سردسیری:

کارایی تجزیه نفت به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار دارد. عواملی مانند دما، میزان اختلاط ناشی از امواج، دسترسی به اکسیژن و ترکیب شیمیایی نفت نشت‌شده نقش تعیین‌کننده‌ای در سرعت و کیفیت فرآیند تجزیه دارند. بنابراین، هنگام طراحی و اجرای برنامه‌های مقابله با آلودگی نفتی باید شرایط محلی دقیقاً مدنظر قرار گیرد تا نتایج مؤثرتر و پایدارتر حاصل شود. [۸] در مناطق سردسیر مانند قطب شمال، اثرات نشت نفت طولانی‌تر باقی می‌مانند زیرا دمای پایین و وجود یخ فرآیندهای طبیعی تجزیه را کند می‌کنند. در محیط‌های دریایی، نفت به سرعت در فواصل وسیع پخش می‌شود، در حالی که در خشکی بیشتر در نقاط خاص باقی می‌ماند. در آب‌وهوای سرد، مکانیسم‌های زیستی و فیزیکی مانند پراکندگی، سخت شدن، تجزیه زیستی، تجمع زیستی و انحلال نقش اصلی در کنترل آلودگی دارند، اما فرآیندهای شیمیایی مانند فوتولیز به دلیل محدودیت‌های دمای پایین کمتر مؤثر هستند. [۵]

۱۷.زیست‌توده جلبکی:

زیست‌توده جلبکی(Algal biomass) یکی از منابع نویدبخش برای زیست‌پالایشگاه‌ها محسوب می‌شود. زیست‌پالایشگاه‌ها با استفاده از مسیرهای پردازش بهینه، امکان تولید انرژی زیستی، سوخت‌های زیستی، مواد زیستی، مواد بیوشیمیایی و حتی محصولات غذایی را فراهم می‌کنند. این سیستم‌ها نه تنها به کاهش وابستگی به منابع فسیلی کمک می‌کنند، بلکه با بهره‌گیری از زیست‌توده و فناوری‌های نوین، رویکردی پایدار برای مدیریت منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی ارائه می‌دهند. این ماده می‌تواند از طریق فرآیندهای پیرولیز، گازی‌سازی، احتراق یا مایع‌سازی هیدروترمال به انواع مختلفی از سوخت‌های زیستی تبدیل شود. در گذشته تمرکز بر تولید یک محصول واحد از ریزجلبک‌ها بود، اما اخیراً رویکرد زیست‌پالایشگاهی به تولید چندین محصول همزمان تغییر یافته است. [۱۶]

ریزجلبک‌ها میکروارگانیسم‌های تک‌سلولی و فتوسنتزکننده‌ای هستند که بخش اصلی فیتوپلانکتون‌ها را در محیط‌های آبی تشکیل می‌دهند. طی دهه گذشته، این موجودات به دلیل کاربردهای گسترده در حوزه‌های تغذیه‌ای، دارویی و صنعتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. ریزجلبک‌ها توانایی تولید متابولیت‌های ارزشمندی مانند کاروتنوئیدها، آنتی‌اکسیدان‌ها و لیپیدها را دارند که علاوه بر ارزش زیستی، به‌عنوان مواد اولیه برای تولید سوخت‌های زیستی نیز کاربرد دارند.توانایی ریزجلبک‌ها، به‌ویژه ریزجلبک‌های سبز، در حذف آلاینده‌های ناشی از نفت خام تمرکز دارد. ریزجلبک‌ها با قابلیت متابولیزه کردن ترکیبات آلاینده و استفاده از آن‌ها به‌عنوان منابع کربن، می‌توانند در یک فرآیند سبز به کاهش آلودگی کمک کنند.علاوه بر این، آن‌ها با آزادسازی اکسیژن در جو و کاهش سطح CO_2، نقش مهمی در بهبود کیفیت محیط زیست ایفا می‌کنند. این ویژگی‌ها ریزجلبک‌ها را به یک گزینه ایده‌آل برای زیست‌پالایی نفت خام تبدیل کرده است. [۱۷]

لیپیدهای موجود در ریزجلبک‌ها قابلیت تبدیل به بیودیزل را دارند. این فرآیند از طریق واکنش تری‌گلیسیریدها با الکل در حضور یک کاتالیزور انجام می‌شود. برای دستیابی به بالاترین ارزش افزوده، باقی‌مانده حاصل از تولید بیودیزل و محصولات جانبی با ارزش بالا می‌تواند وارد فرآیندهای ترموشیمیایی یا بیوشیمیایی شود و به تولید محصولات مکمل منجر گردد. این رویکرد یک سیستم یکپارچه و پایدار ایجاد می‌کند که از زیست‌توده جلبکی بیشترین بهره‌برداری را ممکن می‌سازد. [۱۶]

استفاده از ریزجلبک‌ها نسبت به سایر میکروارگانیسم‌ها مزایای قابل توجهی دارد. این مزایا شامل: توانایی بالای متابولیزه کردن آلاینده‌های نفتی،تولید محصولات جانبی با ارزش،همزمان بهبود کیفیت هوا و آب. بنابراین، ریزجلبک‌ها می‌توانند به‌عنوان یک راهکار پایدار و چندمنظوره در مدیریت آلودگی‌های نفتی مطرح شوند. [۱۷]

بحث‌ونتیجه گیری:

مرور مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه زیست‌پالایی به‌عنوان روشی پایدار و کم‌هزینه در مقایسه با روش‌های فیزیکی و شیمیایی مطرح است، اما کارایی آن به‌شدت وابسته به شرایط محیطی، نوع هیدروکربن‌ها و ساختار جامعه میکروبی بومی است. حضور آلکان‌های زنجیره‌بلند، ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)، رزین‌ها و آسفالتین‌ها می‌تواند سرعت تجزیه را محدود کند و در شرایط کم‌اکسیژن یا مناطق سردسیر این محدودیت تشدید می‌شود. با این حال، شواهد ارائه‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از کنسرسیوم‌های میکروبی، تولید بیوسورفکتانت‌ها توسط جنس‌هایی مانند Pseudomonas و Bacillus، به‌کارگیری قارچ‌های دارای آنزیم‌های لیگنینولیتیک و همچنین تلفیق زیست‌پالایی با بیوچار و گیاه‌پالایی می‌تواند تنوع میکروبی را افزایش داده و کارایی تجزیه را به‌طور معناداری ارتقا دهد. علاوه بر این، ظرفیت

ریزجلبک‌ها در متابولیزه‌کردن آلاینده‌ها و هم‌زمان تولید محصولات با ارزش افزوده، رویکرد زیست‌پالایشگاهی را تقویت می‌کند. بنابراین، موفقیت زیست‌پالایی نه در استفاده از یک عامل منفرد، بلکه در طراحی یک سیستم یکپارچه زیستی متناسب با شرایط اکولوژیک هر منطقه نهفته است.

در نتیجه، آلودگی نفتی به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین و پایدارترین تهدیدهای زیست‌محیطی، پیامدهای گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های آبی، خاک، تنوع زیستی و سلامت انسان دارد. شواهد نشان می‌دهد که میکروارگانیسم‌ها شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، آرکی‌ها و ریزجلبک‌ها با بهره‌گیری از سازوکارهای آنزیمی، تولید بیوسورفکتانت‌ها و مسیرهای متابولیکی تخصصی، توانایی تجزیه طیف وسیعی از هیدروکربن‌های نفتی از آلکان‌های زنجیره‌بلند تا ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای را دارند. زیست‌پالایی به‌عنوان رویکردی سازگار با محیط زیست، کم‌هزینه و پایدار، می‌تواند با مدیریت صحیح شرایط محیطی، استفاده از کنسرسیوم‌های میکروبی و تلفیق با فناوری‌هایی نظیر بیوچار و ریزجلبک‌ها، نقش مؤثری در بازگرداندن تعادل اکولوژیک ایفا کند. با این حال، کارایی این فرآیند به شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک و نوع آلاینده وابسته بوده و نیازمند طراحی هدفمند و ارزیابی اکولوژیکی دقیق است تا پایداری و اثربخشی بلندمدت آن تضمین گردد.

در آینده، توسعه فناوری‌های مبتنی بر مهندسی ژنتیک و بیوتکنولوژی، به‌کارگیری کنسرسیوم‌های میکروبی بهینه‌سازی‌شده و ادغام زیست‌پالایی با رویکردهای زیست‌پالایشگاهی می‌تواند مسیرهای نوینی برای افزایش کارایی و پایداری این فناوری فراهم سازد.

منابع:

[۱]Sharma, K., Shah, G., Singhal, K., & Soni, V. (2024). Comprehensive insights into the impact of oil pollution on the environment. Regional Studies in Marine Science, 74, 103516. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103516

[۲]Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Tripathi, M. (2022). Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: A review for a green and sustainable environment. Toxics, 10(8), 484. https://doi.org/10.3390/toxics10080484

[۳]Troisi, G., Barton, S., & Bexton, S. (2016). Impacts of oil spills on seabirds: Unsustainable impacts of non-renewable energy. Marine Environmental Research, 112, 48–56. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.04.007

[۴]da Silva Correa, H., Blum, C. T., Galvão, F., & Maranho, L. T. (2022). Effects of oil contamination on plant growth and development: A review. Environmental Science and Pollution Research, 29(29), 43501–43515. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19939-9

[۵]Che Samsuria, N. N., Wan Ismail, W. Z., Mohamed Nazli, M. N. W., Ab Aziz, N. A., & Ghazali, A. K. (2025). Problems, effects, and methods of monitoring and sensing oil pollution in water: A review. Water, 17(9), 1252. https://doi.org/10.3390/w17091252

[۶]Ayilara, M. S., & Babalola, O. O. (2023). Bioremediation of environmental wastes: The role of microorganisms. Frontiers in Agronomy, 5, 1183691. https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691

[۷] Kensa, V. M. (2011). Bioremediation – An overview. *Journal of Industrial Pollution Control*, 27(2), 161–168.

[۸]Brooijmans, R. J., Pastink, M. I., & Siezen, R. J. (2009). Hydrocarbon-degrading bacteria: The oil-spill clean-up crew. Microbial Biotechnology, 2(6), 587–594. https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00151.x

[۹]Liu, Y., Zhang, J., Yang, S., & Yang, H. (2023). Biodegradation and removal of heavy oil using Pseudomonas sp. and Bacillus spp. isolated from oily sludge and wastewater in Xinjiang Oilfield, China. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(3), 110123. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110123

[۱۰]Al-Otibi, F., Al-Zahrani, R. M., & Marraiki, N. (2023). Biodegradation of selected hydrocarbons by Fusarium species isolated from contaminated soil samples in Riyadh, Saudi Arabia. Journal of Fungi, 9(2), 216. https://doi.org/10.3390/jof9020216

[۱۱]Zhang, J., Feng, W., & Ren, L. (2024). Fungal extracellular enzymes from Aspergillus spp. as promising candidates for extra-heavy oil degradation and enhanced oil recovery. Microorganisms, 12(11), 2248. https://doi.org/10.3390/microorganisms12112248

[۱۲]Fang, X., Zhang, M., Zheng, P., Wang, H., Wang, K., Lv, J., & Shi, F. (2024). Biochar-bacteria-plant combined potential for remediation of oil-contaminated soil. Frontiers in Microbiology, 15, 1343366. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1343366

[۱۳]Cabral, L., Giovanella, P., Pellizzer, E. P., Teramoto, E. H., Kiang, C. H., & Sette, L. D. (2022). Microbial communities in petroleum-contaminated sites: Structure and metabolisms. Chemosphere, 286, 131752. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131752

[۱۴]Brejea, R., Boroș, M., Roșca, S., Traian, J. E., Budău, R., Borza, I. M., & Păcurar, I. (2023). Bioremediation of oil contaminated soil and restoration of land historically polluted with oil products in the agricultural circuit in the plain and western hills, Romania. Applied Sciences, 13(18), 10245. https://doi.org/10.3390/app131810245

[۱۵]ITOPF. (2024). Oil tanker spill statistics 2024. International Tanker Owners Pollution Federation Limited. Retrieved December 2, 2025, from https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/oil-tanker-spill-statistics-2024/

[۱۶]Ahmed, A., & Makkawi, Y. (2025). The biorefinery paradigm: Technologies, feedstocks, and retrofitting for future sustainable energy. Energies, 18(22), 5919. https://doi.org/10.3390/en18225919

[۱۷]Radice, R. P., De Fabrizio, V., Donadoni, A., Scopa, A., & Martelli, G. (2023). Crude oil bioremediation: From bacteria to microalgae. Processes, 11(2), 442. https://doi.org/10.3390/pr11020442

[۱۸]Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., & Hamid, F. S. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. Environmental Technology & Innovation, 17, 100526. https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526

[۱۹]Chunyan, X., Qaria, M. A., Qi, X., & Daochen, Z. (2023). The role of microorganisms in petroleum degradation: Current development and prospects. Science of the Total Environment, 865, 161112. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161112

[۲۰]Askari Mehrabadi, M., Amini, F., & Sabeti, P. (2014). Evaluation of phytoremediation of petroleum hydrocarbon and heavy metals using Catharanthus roseus. Journal of Plant Biology of Iran, 6(21), 111–126.

[۲۱]Sutormin, O. S., Goncharov, A. S., Kratasyuk, V. A., Petrova, Y. Y., Bajbulatov, R. Y., Yartsov, A. E., & Shpedt, A. A. (2024). Effects of oil contamination on range of soil types in Middle Taiga of Western Siberia. Sustainability, 16(24), 11204. https://doi.org/10.3390/su162411204

[۲۲]Hassanshahian, M., Amirinejad, N., & Askarinejad Behzadi, M. (2020). Crude oil pollution and biodegradation at the Persian Gulf: A comprehensive review study. Journal of Environmental Health Science & Engineering, 18(2), 1415–1435. https://doi.org/10.1007/s40201-020-00557-x