



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله مرور ساختاریافته



کاربرد سامانه سلول‌های میکروبی تثبیت شده در تصفیه زیستی پساب آلوده به ترکیبات آروماتیک: مقاله مروری

علی پرتوی نیا^{۱*}، زهرا شمس‌الهی^۲

۱- گروه مهندسی پالایش زیستی، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- گروه طراحی و شبیه‌سازی فرآیندها، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله:

چکیده

زمینه و هدف: زیست‌سالم‌سازی آلاینده‌ها، روشی مطلوب برای تجزیه آنها به مواد کم‌خطر توسط میکروارگانیسم‌ها است. تاکنون در بیشتر تحقیقات از میکروارگانیسم‌ها به صورت سلول آزاد استفاده شده که مشکلات کاربردی مختلفی دارند. استفاده از تکنولوژی تثبیت سبب بهبود راندمان تجزیه زیستی و رفع اکثر معایب سلول‌های آزاد شده است. هدف این مقاله مروری، بررسی امکان کاربرد تکنولوژی تثبیت سلولی براساس حامل‌های پلیمری در حذف آلاینده‌های آروماتیک در مقیاس آزمایشگاهی (فلاسک لرزان و بیوراکتور) است. همچنین، مقایسه عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت شده در شرایط محیطی مختلف از دیگر اهداف این مطالعه است.

روش بررسی: در این تحقیق به ترتیب ۴۰۱، ۷۸، ۴۹، ۱۴۵۰، ۰ و ۰ مقاله در پایگاه‌های اطلاعاتی Scopus، Web of Science، PubMed، Google Scholar، SID و MagIran با استفاده از واژگان کلیدی "Cell immobilization, Biodegradation, Aromatic" جستجو شد. از مجموع ۱۹۷۸ مقاله جستجو شده، پس از حذف ۱۱۶۷ مقاله، تعداد ۸۱۱ مقاله مورد بررسی بیشتر قرار گرفت.

یافته‌ها: مطالعات انجام شده در این زمینه، نشان‌دهنده موفقیت آمیز بودن حذف آلاینده‌ها توسط سلول‌های تثبیت شده با استفاده از ماتریس‌های مناسب در شرایط عملیاتی مختلف است و همچنین در میان سامانه‌های تثبیت سلولی، تله‌اندازی سلول‌ها درون حامل‌های پلیمری، پرکاربردترین روش زیست‌سالم‌سازی آلاینده‌های آروماتیک است.

نتیجه‌گیری: با توجه به عملکرد سلول‌های تثبیت شده در مقایسه با سلول‌های آزاد به‌ویژه در شرایط محیطی نامساعد، قابلیت استفاده مجدد سلول‌های تثبیت شده و کاربرد آنها در بیوراکتورها و بحث افزایش مقیاس، کاربرد این روش‌ها می‌تواند در بحث تصفیه فاضلاب در کشور مورد توجه محققان قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۷
تاریخ ویرایش: ۹۸/۰۳/۲۱
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۲۶
تاریخ انتشار: ۹۸/۰۶/۱۳

واژگان کلیدی: ترکیبات آروماتیک، زیست‌سالم‌سازی، تثبیت سلولی، تله‌اندازی، حامل پلیمری

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

a_partovi@sbu.ac.ir

مقدمه

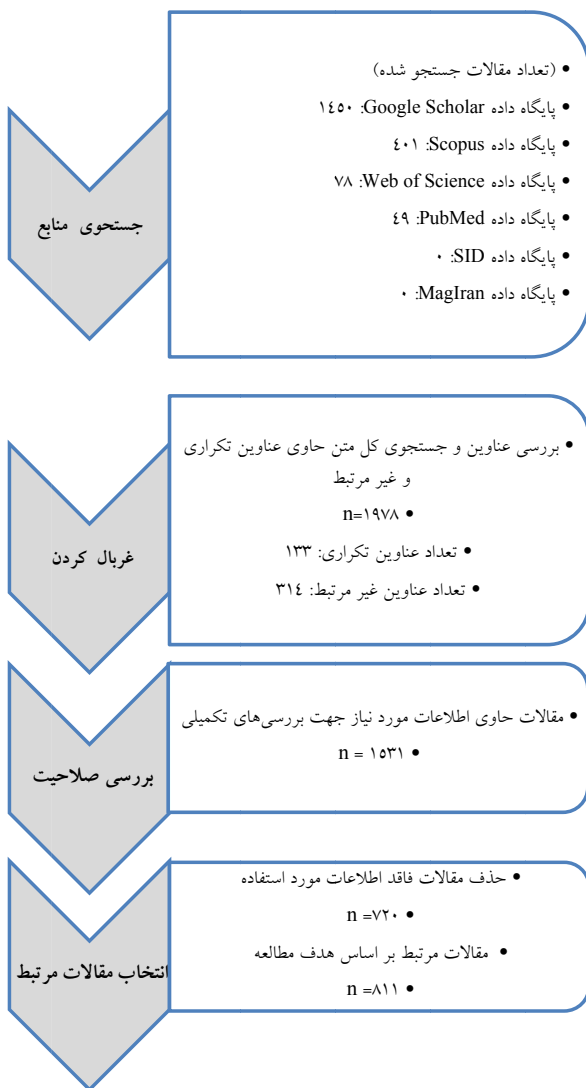
مونوآروماتیک‌ها به دلیل حلالیت آبی نسبتاً بالا از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های منابع آب به‌شمار می‌روند. در بین مونوآروماتیک‌ها، حضور فنل و مشتقات آن در پساب خروجی صنایعی مانند داروسازی، پتروشیمی، کاغذسازی، آفت‌کش‌ها و ... نگرانی جدی محیط‌زیستی محسوب می‌شود و آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا آنها را به‌عنوان آلاینده‌های اولیه معرفی کرده است (۳-۱). اگرچه طبق اعلام آژانس حفاظت محیط زیست و سازمان بهداشت جهانی حداکثر غلظت مجاز فنل در پساب و آب قابل شرب به ترتیب 1 mg/L و $1 \mu\text{g/L}$ است (۴)، اما غلظت آن در پساب صنایع در محدوده 10 تا 3000 mg/L متغیر است (۵). لذا در سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده در زمینه حذف آلاینده‌های آروماتیک انجام شده است.

برای سالم‌سازی مناطق آلوده و حذف انواع آلاینده‌های محیط زیست، روش‌های مختلفی نظیر روش‌های فیزیکی (جذب کربنی، دفن کردن و...)، شیمیایی (تبادل یونی، اکسیداسیون شیمیایی و...) و حرارتی (سوزاندن، دفع حرارتی و...) وجود دارد. اگرچه این روش‌ها می‌توانند در کاهش سطح آلاینده‌ها مؤثر باشند اما دارای هزینه بالا هستند (۶) و معمولاً سبب انتقال آلاینده از یک فاز به فاز دیگر می‌شوند (۷). به همین دلایل، استفاده از روش‌های بیولوژیکی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. زیست‌سالم‌سازی (Bioremediation) شامل تبدیل آلاینده‌ها به مواد غیرسمی و بی‌ضرر (یا کم‌ضرر) به‌ویژه آب و کربن دی‌اکسید توسط میکروارگانیسم‌هاست (۸). از جمله مزایای زیست‌سالم‌سازی می‌توان به سادگی فرایند، مقرون به‌صرفه بودن، امکان از بین رفتن کامل آلودگی و قابلیت کاربرد در مقیاس وسیع اشاره کرد. به‌طور کلی این روش سازگار به محیط زیست، مؤثرتر و بی‌ضررتر از روش‌های معمول است (۹-۱۱). وجود میکروارگانیسم‌های بومی در مکان آلوده، مهم‌ترین عامل در امکان انجام فرایند زیستی است (۱۲). از یک منظر کلی، آلاینده‌ها به دو دسته آب‌گریز و آبدوست تقسیم‌بندی می‌شوند. تجمع هیدروکربن‌های آب‌گریز در محیط‌های مختلف به دلیل غیرقطبی بودن، حلالیت و دسترس‌پذیری پایین،

سالم‌سازی و حذف آنها را همواره با چالش‌هایی روبرو کرده است. از این‌رو، در مقاله مروری Partovinia و همکار، به بررسی کاربرد سامانه‌های تثبیت سلولی در حذف ترکیبات نفتی و آلاینده‌های آلی آب‌گریز پرداخته شده است (۱۳) و در مقاله حاضر، هدف مطالعه کاربرد سامانه‌های سلولی تثبیت شده بر اساس حامل‌های پلیمری به‌ویژه روش تله‌اندازی در تجزیه زیستی هیدروکربن‌های آبدوست و ترکیبات آروماتیک به‌عنوان آلاینده‌های سرطان‌زا است. همچنین، عملکرد سلول‌های تثبیت شده و آزاد در شرایط محیطی مختلف بررسی شده است. کاربرد سلول‌های تثبیت شده در بیوراکتورهای آزمایشگاهی نیز نشان‌دهنده امکان‌پذیر بودن فرایند در مقیاس‌های وسیع و تصفیه پساب‌های صنعتی است.

مواد و روش‌ها

جهت بررسی مقاله‌ها و پژوهش‌های منتشر شده در راستای استفاده از سامانه تثبیت سلولی در حذف آلاینده‌های آروماتیک، جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف انجام شد. در مرحله اول، پس از جستجو با واژه‌های مختلف در پایگاه داده Scopus، کلمات کلیدی "Cell immobilization" و "Biodegradation" انتخاب شدند. در این مرحله به تعدادی از منابع مورد نیاز برای نگارش مقاله دست یافتیم. سپس به منظور دستیابی به هدف اصلی مطالعه، پایگاه‌های اطلاعاتی Scopus، PubMed، Web of Science، Google Scholar، MagIran و SID مورد بررسی قرار گرفتند و واژگان کلیدی "Cell immobilization"، "Biodegradation" و "Aromatic" در قسمت عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها و همچنین محتوای کل مقالات جستجو شدند. شکل ۱ فرایند جستجو و انتخاب منابع مطالعاتی را نشان می‌دهد. در این تحقیق به ترتیب ۴۰۱، ۷۸، ۴۹، ۱۴۵۰، ۰ و ۰ مقاله در پایگاه‌های اطلاعاتی Google.PubMed.Web of Science.Scopus، MagIran و SID، Scholar، Cell immobilization, Biodegradation، "Aromatic" جستجو شد. از مجموع ۱۹۷۸ مقاله جستجو



شکل ۱- فرایند جستجو و انتخاب منابع مطالعاتی

باشند. پلیمرهایی مانند آلژینات، آگار، آگاروز، سلولز، کاراژینان، کایتوزان و کیتین جزء این گروه از حامل‌ها هستند. حامل‌های پلیمری طبیعی آبدوست، زیست‌تخریب‌پذیر، سازگار با محیط‌زیست و ارزان هستند، اما به دلیل مقاومت و پایداری مکانیکی پایین، حساس بودن به دما و pH کاربرد محدودتری جهت تثبیت سلول‌ها دارند (۱۴، ۱۷، ۱۸). از پلیمرهای آلی و سنتزی می‌توان به پلی‌آکریل آمید، پلی‌پروپیلن، پلی‌استایرن، پلی‌وینیل کلراید، پلی‌وینیل الکل، پلی‌آکریلو نیتریل و فوم پلی‌اورتان اشاره کرد. این گروه مقاومت مکانیکی بالاتری نسبت

شده، پس از حذف ۱۱۶۷ مقاله، تعداد ۸۱۱ مقاله مورد بررسی بیشتر قرار گرفت. مقاله‌های پژوهشی و مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی بیشترین سهم منابع را به خود اختصاص دادند. از طرفی، با توجه به ارتباط موضوعی و انتخاب مجلات معتبر، مقالاتی که به‌طور خاص مرتبط با سامانه تثبیت سلولی در حذف آلاینده‌های مونوآروماتیک و ترکیبات پلی‌سیکلیک آروماتیک هستند، مورد مطالعه قرار گرفتند. نکته قابل ذکر این است که به دلیل اهمیت موضوع و تمرکز مطالعه حاضر بر عملکرد سلول‌های تثبیت شده به روش تله‌اندازی درون ماتریس‌های پلیمری، از جستجوی واژگان کلیدی دیگر (مانند تله‌اندازی، نوع و نام حامل، نام آلاینده، مقایسه عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت‌شده، اثر فاکتورهای محیطی، بیوراکتور تثبیت شده و غیره) نیز در پایگاه‌های اطلاعاتی استفاده شده است.

یافته‌ها

تکنولوژی تثبیت سلولی و حامل‌های مورد استفاده در

تثبیت سلولی

تثبیت به معنای محدود کردن حرکت سلولی یا آنزیمی با حفظ زنده ماندن و عملکرد کاتالیزوری آنها است (۱۴). تثبیت سلولی از دهه‌های ۶۰-۷۰ میلادی مورد توجه قرار گرفته و تاکنون مطالعات بسیاری از کاربرد این تکنولوژی در زمینه‌های مختلف صورت گرفته است (۱۵). سامانه‌های تثبیت سلولی، موجب حفظ حیات و عملکرد سلول‌ها در مدت زمان طولانی و بهبود بازدهی فرایند حذف و تجزیه زیستی آلاینده‌ها می‌شوند که در سال‌های اخیر کاربرد روزافزونی یافته‌اند (۱۶). به‌طور کلی تکنولوژی تثبیت سلولی اکثر معایب استفاده از سلول‌های آزاد را رفع می‌کند و سبب افزایش عملکرد فرایندهای زیست‌سالم‌سازی می‌شود، اما امکان غیرفعال شدن سلول‌ها در حین تثبیت، امکان نشت سلولی از حامل، محدودیت نفوذ اکسیژن و مواد مغذی از جمله معایب این روش به‌شمار می‌روند.

در فرایند تثبیت سلولی از حامل یا ماتریس‌های مختلفی استفاده می‌شود که به دو دسته کلی آلی و غیرآلی تقسیم‌بندی می‌شوند و حامل‌های آلی خود می‌توانند طبیعی یا سنتزی

سلول‌ها، محدودیت نفوذی را کاهش می‌دهد. جذب سطحی بین سلول‌ها و حامل توسط پیوندهای ضعیف نظیر هیدروژنی، یونی، واندروالس و الکتروستاتیکی تشکیل می‌شود، لذا امکان جدا شدن سلول‌ها از سطح وجود دارد (۱۴، ۱۶-۱۸).

تثبیت سلولی به روش اتصال به سطح توسط اتصال الکتروستاتیکی روی یک سطح شبیه به جذب سطحی است، اما احتمال نشت سلولی کمتر است. این روش نیاز به شستشوی سطح حامل با یک محلول بافری دارد تا سطح حامل آب‌دوست شود و بتواند بارهای منفی سلولی را جذب کند (۱۴). روش دیگر اتصال به سطح، ایجاد پیوند کووالانسی بین حامل غیرآلی و سلول‌ها در حضور عامل اتصال‌دهنده عرضی است که برگشت‌پذیر بوده و به تغییرات شیمیایی سطح حامل بستگی دارد. البته لازم به ذکر است که سمیت عوامل اتصال‌دهنده در این روش سبب کاهش فعالیت سلول‌ها می‌شود (۱۴، ۱۷، ۱۸). تثبیت سلولی به روش تله‌اندازی درون یک ماتریس متخلخل، در فرایندهای زیست‌سالم‌سازی بیش از سایر روش‌ها مورد توجه است. پس از تثبیت سلول‌ها درون یک شبکه پلیمری جامد، انتقال مواد مغذی و متابولیت‌های تولید شده از طریق منافذ ماتریس پلیمری انجام می‌شود. تله‌اندازی روشی سریع، غیرسمی، مقاوم و نسبتاً ارزان است و علاوه بر اینکه سبب محافظت سلول‌ها در برابر شرایط محیطی می‌شود، از نشت زیاد سلولی به محیط نیز جلوگیری می‌کند. اما دارای محدودیت‌هایی مانند غیرفعال شدن برخی سلول‌ها حین فرایند تثبیت، کاهش نفوذپذیری مواد مغذی و در نتیجه کاهش فعالیت متابولیکی سلول‌های موجود در لایه‌های داخلی ماتریس است. بنابراین

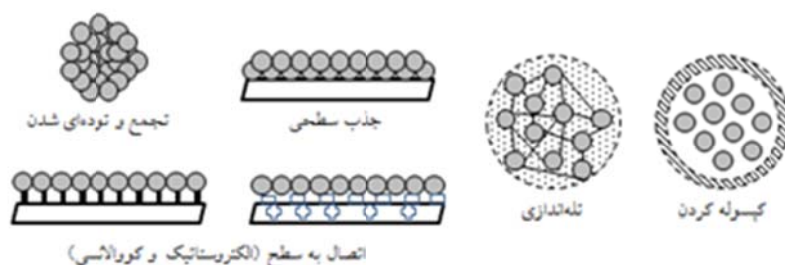
به پلیمرهای طبیعی دارند (۱۷). دسترس‌پذیری آسان، قیمت مناسب، امکان تنظیم و اصلاح ساختار از مزایای پلیمرهای سنتزی به‌شمار می‌روند (۱۴). انتخاب مواد غیرآلی نیز مانند زئولیت، سرامیک، شیشه متخلخل، زغال چوب فعال، سنگ‌های آتشفشانی و آنتراسیت به‌عنوان حامل به دلایلی از جمله مقاومت بالا در برابر دما، pH، مواد شیمیایی و تخریب میکروبی است (۱۷، ۱۸) و به‌دلیل گروه‌های عاملی کم و عدم اتصال مناسب با سلول‌ها بیشتر در ساخت حامل ترکیبی استفاده می‌شوند (۱۴).

انواع سامانه‌های تثبیت سلولی

براساس مکانیسم فیزیکی، پنج نوع سامانه تثبیت سلولی وجود دارد که شماتیک آنها در شکل ۲ نشان داده شده است.

روش تجمع و توده‌ای شدن تثبیت بدون نیاز به حامل، در مواردی که سلول‌ها به‌طور طبیعی تمایل به تجمع و توده‌ای شدن دارند، مشاهده می‌شود. به‌دلیل تشکیل توده‌های بزرگ، سلول‌های درونی به‌عنوان سلول‌های تثبیت شده در نظر گرفته شده و استفاده از این روش را در راکتورها و همچنین سیستم‌های تصفیه فاضلاب به صورت بی‌هوازی امکان‌پذیر می‌کند (۱۶، ۱۹).

تثبیت سلولی به روش برگشت‌پذیر جذب سطحی، توسط فعل و انفعالات فیزیکی بین غشای سلول و سطح حامل غیرمحلول در آب انجام می‌شود. در این سامانه تثبیت حامل‌های غیرآلی (سرامیک، شیشه متخلخل)، آلی (چوب، خاک اره) و پلیمری (سلولز) استفاده می‌شود. این روش سریع، ساده و بدون نیاز به افزودنی‌های شیمیایی است و تماس مستقیم بین محیط و



شکل ۲- شماتیک انواع سامانه‌های تثبیت سلولی (۱۴، ۱۶)

قابل توجه سلول‌ها در شرایط نامساعد محیطی است. اما با وجود میزان بالای دانسیته سلولی بارگذاری شده در کپسول‌ها به دلیل امکان محدودیت‌های نفوذی غشاء و احتمال آسیب آن در اثر رشد سلولی، به‌ندرت در زیست سالم‌سازی استفاده شده است. این روش، تاکنون در شرایط آزمایشگاهی استفاده شده و در مقیاس صنعتی تصفیه استفاده نشده است (۱۴، ۱۷، ۱۸، ۲۱).

بحث

عملکرد ماتریس‌های پلیمری در تجزیه‌زیستی آلاینده‌های آروماتیک

جدول ۱ برخی از تحقیقات انجام شده در تجزیه زیستی آلاینده‌های آروماتیک توسط سلول‌های تثبیت شده به روش تله‌اندازی در ماتریس‌های پلیمری مختلف و راندمان تجزیه زیستی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اکثر تحقیقات،

حامل مورد استفاده باید ساختار مناسبی داشته باشد و نسبت اندازه منافذ آن به اندازه سلول‌ها در نظر گرفته شود (۱۴، ۱۷، ۱۸، ۲۰). به‌طور کلی تله‌اندازی سلول‌ها به دو شیوه تله‌اندازی ژل و استفاده از حامل پیش‌ساخته انجام می‌شود (۱۳). در تله‌اندازی ژل، ماتریس متخلخل بصورت درجا اطراف سلول‌ها سنتز می‌شود. بدین ترتیب که ابتدا محلول پلیمری و سلولی مخلوط شده و فرایند تشکیل ژل به دو روش کلی افتادن قطره و استفاده از قالب انجام می‌پذیرد. در روش قطره، مخلوط پلیمر-سلول توسط یک سرنگ به داخل محلول اتصال‌دهنده عرضی ریخته می‌شود.

روش کپسوله کردن سلول‌ها یا نگهداری سلول‌ها درون یک غشای پلیمری متخلخل همانند تله‌اندازی، برگشت‌ناپذیر است، اما برخلاف آن سلول‌ها توسط یک غشاء نیمه‌تراوای نازک احاطه می‌شوند. در این حالت سلول‌ها به دلیل قرار گرفتن در یک محیط آبی، بصورت آزادانه حرکت می‌کنند و رشد آنها نیز به آسانی صورت می‌گیرد. مهم‌ترین مزیت این روش، حفاظت

جدول ۱- تجزیه‌زیستی برخی ترکیبات آروماتیک توسط سلول‌های تله‌اندازی شده در ماتریس‌های پلیمری

مرجع	غلظت اولیه، میزان حذف آلاینده	مدت زمان حذف آلاینده	فاز مورد بررسی	محل جداسازی سوبه	میکروارگانیسم	آلاینده	ماتریس پلیمری
(۲۲)	$>90\%$ ، 100 mg/kg	۴۰ روز	خاک	خاک آلوده به آلاینده	سودوموناس	فنانترن	
(۲۳)	$100-1000\text{ mg/L}$ $\%100$	۱۰ روز	آب	خریداری شده	مایکوباکتریوم	پیرین	
(۴)	$100-1200\text{ mg/L}$ $\%100$	۸-۲۹۰ ساعت	آب	خریداری شده	سودوموناس آئروژینوزا	فنل	آلژینات
(۲۴)	53 mmol/dm^3 $\%100-85$	۲۴ ساعت	آب	خریداری شده	سودوموناس پوتیدا	فنل	
(۲۵)	625% ، 5 mg/L	۱ روز	آب	-	سودوموناس	۴و۲-تری کلروفنل	
(۲۶)	$100-200\text{ mg/L}$ $\%100$	۴ روز	آب	مکان‌های مختلف آلوده به آلاینده	فلاووباکتریوم	پنتاکلروفنل	فوم پلی‌اورتان
(۲۷)	$58/9$ ، 190 ng/g	۴۲ روز	خاک	رسوبات آلوده به آلاینده	سودوموناس	بنزو [a] پیرین	کایتوزان
(۲۸)	100 mg/L $\%100-90$	۲۶-۳۷ ساعت	آب	خریداری شده	سودوموناس پوتیدا	فنل	
(۲۹)	100 mg/L $> \%80$	۱۰ روز	آب	مکان آلوده به آلاینده	سراتیا	فلورانتن	

جدول ۱- تجزیه‌زیستی برخی ترکیبات آروماتیک توسط سلول‌های تله‌اندازی شده در ماتریس‌های پلیمری

مرجع	غلظت اولیه، میزان حذف آلاینده	مدت زمان حذف آلاینده	فاز مورد بررسی	محل جداسازی سویه	میکروارگانیسم	آلاینده	ماتریس پلیمری
(۳۰)	۰.۴۰۰ mg/L، ۸۴٪ ۰.۴۰۰ mg/L، ۹۰٪ ۰.۱۵ - ۳۰ mM ۷۸/۶۷٪ - ۸۹/۳۴٪ ۰.۱۵ - ۳۰ mM ۷۴ - ۸۸٪	۹ روز	آب	خاک آلوده به آلاینده	باسیلیوس	بنزن	آلژینات - پلی‌وینیل الکل فوم پلی‌اورتان آلژینات آگار
(۳۱)	۰.۱۵ - ۳۰ mM ۱۰۰٪ ۰.۱۵ - ۳۰ mM ۸۸ - ۹۳/۳۴٪ ۰.۱۵ - ۳۰ mM ۱۰۰٪	۹۶ ساعت	آب	-	مایکروکوکوس	۲- نیتروتولون	آلژینات - پلی‌وینیل الکل پلی‌اکریل آمید فوم پلی‌اورتان آلژینات آگار
(۳۲)	۰.۲۵ - ۵۰ mM ۱۰۰٪	۳/۵ - ۶ روز ۲/۵ - ۳ روز ۲ - ۶ روز	آب	پساب فاضلاب آزمایشگاه	سودوموناس	نفتالین	پلی‌اکریل آمید فوم پلی‌اورتان آلژینات آگار
(۱)	۰.۱۰۰ mg/L ۱۰۰٪	۳۰ ساعت ۳۰ ساعت ۴۰ ساعت	آب	مکان آلوده به آلاینده‌های دارویی	سودوموناس	فنل	پلی‌وینیل الکل - آلژینات پکتین
(۳۳)	۰.۳۵۰ - ۳۷۰ ppm ۶۴/۷٪	۲۶ هفته	خاک	خاک آلوده به آلاینده	سودوموناس	پنتاکلروفنل	کاپا - کارازینان
(۳۴)	۰.۱۰۰، ۰.۲۰۰ mg/L	۱ - ۳ ماه	آب	خریداری شده	سودوموناس پوتیدا	فنل	پلی‌وینیل الکل - آلژینات
(۳۵)	۰.۱۰۰ - ۵۰۰ ppm ۱۰۰٪	۳ - ۷ روز	آب	لجن فعال پالایشگاه نفت	کنسر سیوم میکربی	فنانترون	پلی‌وینیل الکل
(۳۶)	۲۰۰۰ mg/kg ۱۰۰، ۲۵۰٪	۱۰ روز	دوغابی	لجن فعال پالایشگاه نفت	کنسر سیوم میکربی	فنانترون	پلی‌وینیل الکل
(۳۷)	۰.۱۰۰، ۰.۸۰۰ mg/L	۵۰ ساعت	آب	خاک آلوده به فنل و لجن فعال	مخلوط آسینتوباکتر و اسفینگوموناس	فنل	پلی‌وینیل الکل
(۳۸)	۰.۱۰۰، ۰.۱۰۰ mg/L	۴ روز	آب	-	فلنروکت کریزوسپوریوم	۴- کلروفنل	فوم پلی‌اورتان
(۳۹)	۱ v/v ۱۰۰٪ و ۱۸/۲±۸/۵۱٪	۱۵ روز	آب	چشمه آب گرم	پروتوتکا زایفی	مخلوط الیفاتیک‌ها و پلی‌سیکلیک آروماتیک‌ها	پلی‌وینیل الکل
(۴۰)	۰.۱۰۰، ۰.۲۰۰ mg/L	۳۰ ساعت	آب	لجن فعال مکان آلوده به آلاینده	رودوتورولا موسیلاژینوزا	نیترو بنزن	پلی‌وینیل الکل

نیاز به شرایط ملایم برای تثبیت، تجزیه‌زیستی آسان، نشت سلولی آهسته و پایداری در محدوده وسیعی از pH (۱۰-۳) و دما (بالاتر از ۴۵ °C) است. البته محدودیت‌های انتقال جرم به دلیل تراکم لایه‌های آلژینات، ساییدگی و متورم شدن دانه‌ها در برخی شرایط سبب کاهش کاربرد آن در حذف آلاینده‌ها

میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در فرایند تجزیه‌زیستی از محل آلوده به آلاینده، جداسازی و فرایندهای تجزیه‌زیستی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده‌اند. براساس تحقیقات، تله‌اندازی سلول‌ها در آلژینات بیش از سایر پلیمرهای طبیعی مورد توجه است. این پلیمر دارای مزایایی از جمله ارزان بودن، غیر سمی،

دانه‌ها، کمک به جلوگیری از توده‌ای شدن آنها و تولید دانه‌های کروی شکل می‌شود. همچنین سلول‌های تله‌اندازی شده در این ماتریس ترکیبی عملکرد بهتری نسبت به ماتریس‌های دیگر داشته‌اند و سرعت تجزیه زیستی فنل بویژه در غلظت‌های بالا افزایش یافته است (۱).

علاوه بر انتخاب حامل مناسب، از دیگر عوامل مؤثر بر راندمان تجزیه زیستی، غلظت سلولی بارگذاری شده در دانه‌های ژل است. Song و همکاران (۲۰۰۵) اثر بارگذاری غلظت اولیه سلولی تثبیت شده در ماتریس پلی‌وینیل الکل را بر بازدهی فرایند دنیتریفیکاسیون پساب سنتزی بررسی کردند. براساس نتایج، بازدهی فرایند با افزایش غلظت اولیه سلولی، ابتدا افزایش و سپس به دلیل کاهش نفوذ مواد مغذی به درون دانه‌ها در اثر افزایش میزان سلول، دنیتریفیکاسیون کاهش می‌یابد (۴۷). همچنین در بررسی‌ها نشان داده شده است که افزودن برخی مواد به ماتریس پلیمری در حین فرایند تثبیت سبب بهبود عملکرد سلول‌ها در فرایند تجزیه زیستی آلاینده‌های آروماتیک می‌شود. Massalha و همکاران (۲۰۱۰) استفاده همزمان از رس و پودر کربن فعال را سبب معدنی شدن بهتر غلظت‌های بالای فنل توسط سلول‌های تثبیت شده دانسته‌اند (۴۸). Zhen-Yu و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که افزودن دیاتومیت سبب بهبود تخلخل دانه‌های آلژینات، انتقال جرم و افزایش رشد سلولی و راندمان تجزیه زیستی می‌شود و دیاتومیت رها شده پس از فرایند تجزیه زیستی، سبب بهبود کیفیت خاک می‌شود (۴۲). بنابراین، انتخاب حامل مناسب، سبب عملکرد موفقیت آمیز سلول‌های تثبیت شده در تجزیه آلاینده‌های آروماتیک می‌شود.

مقایسه عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت شده در تجزیه زیستی ترکیبات آروماتیک

در زیست سالم‌سازی مناطق آلوده به آلاینده‌های آروماتیک، زمان و میزان حذف زیستی بسیار حائز اهمیت هستند. به‌طور کلی استفاده از سلول‌های تثبیت شده سبب افزایش راندمان و یا کاهش زمان حذف زیستی آلاینده‌ها نسبت به سلول‌های آزاد شده است. البته در برخی تحقیقات نیز، دلیل

می‌شود (۴۱، ۴۲). همچنین آلژینات در سیستم‌های متشکل از مخلوط میکروارگانیزم‌ها یا کنسرسیون‌های میکروبی به دلیل مصرف آن توسط قارچ‌ها نمی‌تواند حامل مناسبی برای تثبیت سلولی باشد (۴۳). در میان پلیمرهای سنتزی نیز پلی‌وینیل الکل و فوم پلی‌اورتان بیشترین کاربرد را دارند. پلی‌وینیل الکل علی‌رغم سنتزی بودن، غیر سمی است و خصوصاتی مانند استحکام کششی نسبتاً خوب، مقاومت در برابر سایش، مقاومت دمایی، ظرفیت نگهداری آب، زیست‌سازگاری، فرایندپذیری، تخلخل‌های میکرو و ماکرو و تجزیه‌پذیری آهسته دارد (۳۴، ۴۴). همچنین انتخاب پلی‌وینیل الکل با وزن مولکولی و درجه آبکافت بالا سبب افزایش مقاومت مکانیکی، پایداری و دوام آن می‌شود (۴۱). فوم پلی‌اورتان نیز به دلیل کاربرد آسان، ارزان بودن، قابلیت بازیابی، عدم سمیت برای میکروارگانیزم‌ها، مقاومت در برابر حلال‌های آلی و حمله میکروبی، مقاومت مکانیکی بالا، طبیعت آب‌گریز و تخلخل بالا در حذف و تجزیه‌زیستی بسیاری از آلاینده‌ها مورد توجه است (۴۰، ۴۵). تخلخل طبیعی پلی‌اورتان سبب افزایش نفوذ اکسیژن و در نتیجه افزایش فعالیت سلولی می‌شود. در واقع تثبیت سلولی در این پلیمر سبب افزایش سطح تماس مواد مغذی و سلول‌ها و کاهش نیروهای برشی می‌شود (۴۶). همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در برخی مطالعات عملکرد سلول‌های تثبیت شده در ماتریس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال Manohar و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که سلول‌های تثبیت شده در فوم پلی‌اورتان در غلظت‌های بالای نفتالین (۵۰ و ۷۵ mM) عملکرد بهتری نسبت به سلول‌های تثبیت شده در ماتریس‌های دیگر داشته‌اند و فاز تاخیر اولیه تجزیه زیستی نیز حذف شده است. آنها دلیل میزان تجزیه‌زیستی پایین، در آلژینات، آگار و پلی‌آکریل آمید را نفوذ آهسته مواد به درون دانه‌ها دانسته‌اند (۳۲). Mollaei و همکاران (۲۰۱۰) ترکیب پلیمرهای آلژینات و پلی‌وینیل الکل را در تجزیه‌زیستی فنل توسط سلول‌های تثبیت شده به کار بردند. آنها بیان کردند که حضور پلی‌وینیل الکل مقاومت فیزیکی و پایداری دانه‌ها را افزایش می‌دهد و آلژینات نیز سبب بهبود خواص سطحی

(۱۱-۴) بررسی کردند. براساس نتایج آنها، سلول‌های تثبیت شده عملکرد بهتری داشته‌اند و محدوده pH بین ۵-۱۰ و دمای °C ۴۰-۲۵، اثری بر فعالیت سلول‌های تثبیت شده نداشته است، در حالی که سلول‌های آزاد تنها قادر به فعالیت در محدوده pH بین ۸-۷ و °C ۳۵-۳۰ دما بوده‌اند (Zheng, ۳۱). همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان کردند میکروارگانیسم‌های معمول توانایی سالم‌سازی پساب حاوی مقادیر بالای ۳ درصد نمک را ندارند. از این‌رو آنها توانایی سلول مخمر آزاد و تثبیت شده در فوم پلی‌اورتان را در تجزیه زیستی ۲۰۰ mg/L نیتروبنزن در مقادیر مختلف سدیم کلراید (۷-۳ درصد) بررسی کردند و براساس نتایج، سلول‌های تثبیت شده، میزان تجزیه زیستی بالاتری در مدت زمان کمتر داشته‌اند (۴۰).

به نظر می‌رسد یکی از مسائلی که باید در فرایند زیست سالم‌سازی به‌طور خاص به آن توجه کرد، حضور فلزات سنگین و سمی در فاز آب و خاک همراه با آلاینده‌ها به ویژه ترکیبات آروماتیک است و براساس نتایج مطالعه حاضر، تحقیقات کمی در این زمینه انجام شده است. از طرفی پلیمرهایی مانند کایتوزان، آلژینات و پلی‌وینیل الکل نیز به‌دلیل ساختارشان، جاذب‌های مناسبی برای حذف یون‌های فلزات سنگین هستند (۵۲، ۵۳).

عدم موفقیت سلول‌های تثبیت شده مانند افزایش زمان تجزیه، محدودیت‌های نفوذی در حامل بیان شده است و بنابراین نمی‌توان با قطعیت، مطلوب بودن همیشگی سامانه‌های تثبیت سلولی در حذف آلاینده‌های آروماتیک را مطرح کرد. نکته قابل توجه این است که در کاربرد سلول‌های تثبیت شده در حذف آلاینده‌ها، نه تنها رسیدن به درصد حذف بالاتر یا رسیدن به زمان حذف پایین‌تر در مقایسه با سلول‌های آزاد مطلوب است، بلکه عملکرد بهتر و برتری سلول‌های تثبیت شده در شرایط نامساعد محیطی نیز مدنظر است. در جدول ۲ کاربردهای موفق سامانه تثبیت در تجزیه آلاینده‌های آروماتیک اشاره شده است. همانطور که اشاره شد یکی از مزایای مهم سامانه تثبیت، محافظت سلول‌ها در شرایط نامساعد محیطی مانند غلظت بالای آلاینده، تغییرات دمایی و pH، شوری بالا و ترکیبات سمی است. براساس مطالعات ارائه شده در جدول ۲، سلول‌های آزاد به‌دلیل سمیت و اثر بازدارندگی آلاینده در غلظت‌های بالا عملکرد پایین‌تری نسبت به سلول‌های تثبیت شده و محافظت شده در حامل‌ها دارند. Mulla و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت شده در فوم پلی‌اورتان در تجزیه زیستی ۲- نیتروتولون را در مقادیر مختلف دما (°C ۴۵-۲۰) و pH

جدول ۲- میزان و زمان تجزیه زیستی برخی هیدروکربن‌های آروماتیک توسط سلول‌های تثبیت شده و آزاد

مرجع	میزان و زمان تجزیه زیستی توسط سلول‌های تثبیت شده	میزان و زمان تجزیه زیستی توسط سلول‌های آزاد	غلظت اولیه آلاینده	آلاینده	ماتریس پلیمری
(۴۹)	۱۰۰٪، ۶۰ ساعت ۹۸٪، ۶۰ ساعت	۶۵٪، ۶۰ ساعت ۳۶٪، ۶۰ ساعت	۴ mM ۱۰ mM	۳- کلرو بنزوات	فوم پلی‌اورتان
(۳۵)	۱۰۰٪، ۳ روز ۱۰۰٪، ۵ روز ۸۰٪، ۷ روز	۱۰۰٪، ۴ روز ۱۰۰٪، ۷ روز ۶۱٪، ۷ روز	۱۰۰ mg/L ۲۵۰ mg/L ۵۰۰ mg/L	فنانترن	پلی‌وینیل الکل
(۵۰)	۹۴٪، ۱۰ روز ۳۴٪، ۱۰ روز ۲۶٪، ۱۰ روز	۷۰٪، ۱۰ روز ۱۷٪، ۱۰ روز کمتر از ۵٪، ۱۰ روز	۲۰ mg/L ۴۰ mg/L ۶۰ mg/L	پارا- کلروفنل	آلژینات
(۵۱)	۵۶٪، ۹۶ ساعت	۳۰٪، ۹۶ ساعت	mg/kg ۱۰۰ soil	پیرین	پلی‌وینیل الکل - آلژینات

همکاران (۲۰۰۹) عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت شده در دانه‌های آلژینات در تجزیه زیستی فناترن موجود در خاک و در حضور آرسنیک، کادمیوم و سرب در مقیاس آزمایشگاهی را بررسی کردند. براساس نتایج، بازدهی حذف توسط سلول‌های تثبیت شده به دلیل جذب فلزات توسط گروه‌های کربوکسیلیک آلژینات کمتر از سلول‌های آزاد بوده است (۲۲).

بنابراین استفاده از سلول‌های تثبیت شده در ماتریس‌های پلیمری در حذف درجا/ در محل (In situ) آلاینده‌های آروماتیک در مواردی ممکن است موفقیت آمیز نباشد. بدین جهت شناسایی دقیق آلاینده‌های موجود در محل و انتخاب حامل مناسب در بازدهی فرایند و همچنین برآورد اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. به‌عنوان مثال Somtrakoon و

جدول ۳- قابلیت استفاده مجدد ماتریس‌های پلیمری تثبیت شده در تجزیه زیستی برخی ترکیبات آروماتیک

مرجع	تعداد دفعات استفاده	ماتریس پلیمری	غلظت اولیه آلاینده	آلاینده
	۱۸	آلژینات	۲۵ mM	
	۳		۵۰ mM	
	۱۲	آگار		
(۳۲)	۳			نفتالین
	۲۳	پلی‌آکریل آمید		
	۵			
	۴۵	فوم پلی‌اورتان		
	۵			
(۳۸)	۳	فوم پلی‌اورتان	۱۰۰ mg/L	۴- کلروفلن
	۱۲	آلژینات	۱۰۰۰ mg/L	
	۱۰		۱۲۰۰ mg/L	
(۱)	۱۵	پلی‌وینیل الکل-		فنل
	۱۱	آلژینات		
	۸	پکتین		
	۵			
	۲۴	فوم پلی‌اورتان		
	۲۴		۱۵ mM	
(۳۱)	۲۰	پلی‌وینیل الکل-	۳۰ mM	
	۱۲	آلژینات		
	۱۸	پلی‌آکریل آمید		۲- نیترو تولوئن
	۹			
	۱۵	آلژینات		
	۶			
	۱۲	آگار		
	۶			
(۴۹)	۴	فوم پلی‌اورتان	۴ mM	۳- کلرو بنزوات
	۴		۱۰ mM	

قابلیت استفاده مجدد از سلول‌های تثبیت شده

یکی دیگر از عواملی که سبب برتری سامانه‌های تثبیت سلولی در فرایندهای تجزیه‌زیستی می‌شود، امکان جداسازی آسان حامل‌ها و سلول‌ها از محیط و قابلیت استفاده مجدد آنها بدون کاهش فعالیت است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، فوم پلی‌اورتان با داشتن خصوصیات مطلوب عملکرد بهتری داشته است. البته لازم به ذکر است که شرایط محیطی و میزان غلظت و سمیت آلاینده در استفاده مجدد از حامل‌های حاوی سلول تثبیت شده و زمان و بازدهی فرایند نیز اثرگذار هستند.

کاربرد بیوراکتورهای حاوی سلول‌های تثبیت شده در تجزیه زیستی ترکیبات آروماتیک

استفاده از بیوراکتورهای حاوی میکروارگانیسم‌های خالص یا کنسرسیوم میکروبی در تجزیه زیستی آلاینده‌های محیط زیست بسیار مورد توجه است و براساس مطالعات انجام شده انواع مختلف و پر کاربرد شامل بیوراکتورهای بستر سیال، ستون حبابی، بستر فورانی (Spouted bed) و بستر پرشده به‌صورت ناپیوسته و پیوسته استفاده شده‌اند. بیوراکتورهای بستر پرشده دارای مزایایی مانند عملیات آسان، بازدهی بالا، زمان ماند بالای مایع و امکان افزایش مقیاس هستند و برای حذف آلاینده‌های با غلظت پایین در حجم بالای پساب مناسب هستند. بیوراکتورهای بستر سیال نیز دارای مزایایی همچون افزایش سطح تماس، کنترل حجم بارگذاری بالا و نرخ بالای انتقال جرم و حرارت هستند (۲). از طرفی بیوراکتورهای بستر پرشده برای ترکیبات آب‌گریز و با حلالیت پذیری پایین در آب مناسب‌تر هستند و بیوراکتورهای بستر فورانی به‌دلیل اختلاط و تماس بهتر بین سلول‌ها و آلاینده، انتقال بهتر اکسیژن و میزان تجزیه‌زیستی بالاتر بر بیوراکتورهای جریان‌ی و ستون حبابی معمول برتری دارند (۵۴). به‌طور کلی بیوراکتورها سبب کاهش تنش‌های هیدرودینامیکی و کنترل بهتر شرایط عملیاتی می‌شوند و بازدهی فرایند را نسبت به سیستم‌های مقیاس کوچک افزایش می‌دهند. اما استفاده از بیوراکتورهای حاوی سلول تثبیت شده دارای مزایایی مانند حفظ توده زیستی فعال در حامل‌ها، کاهش زمان نگهداری و جلوگیری

از شستشوی سلولی هستند. همچنین به‌دلیل قابلیت استفاده مجدد از سلول‌های تثبیت شده، از بیوراکتورهای تثبیت شده در مقیاس‌های بزرگ مانند تصفیه پساب به‌طور پیوسته می‌توان استفاده کرد (۲۰). بنابراین بیوراکتورهای تثبیت شده می‌توانند در تصفیه پساب‌های خروجی صنایع مؤثر باشند. جدول ۴ کاربرد بیوراکتورهای حاوی سلول تثبیت شده در تجزیه زیستی ترکیبات آروماتیک در مقیاس آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

زیست‌سالم‌سازی به دلیل مزایایی همچون سازگاری با محیط زیست، امکان تخریب و تجزیه کامل آلاینده‌ها و ارزان‌تر بودن بسیار مورد توجه است، اما نکته حائز اهمیت این است که سلول‌های میکروبی به‌صورت آزاد تحت شرایط محیطی مختلف ممکن است توانایی خود را از دست بدهند. بنابراین، سامانه‌های تثبیت سلولی با حفظ طولانی مدت سلول‌ها و افزایش عملکرد آنها سبب بهبود فرایند و افزایش بازدهی یا کاهش زمان حذف و تجزیه زیستی آلاینده‌ها می‌شوند که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در میان انواع مختلف سامانه‌های تثبیت سلولی، تله‌اندازی سلول‌ها درون ماتریس‌های پلیمری متخلخل روشی کارآمد و مناسب برای زیست‌سالم‌سازی آلاینده‌های آب‌دوست و آروماتیک محسوب می‌شود. در این تحقیق، مروری بر کاربرد ماتریس‌های پلیمری مورد استفاده در تجزیه‌زیستی آلاینده‌های آروماتیک انجام شد و عوامل مؤثر بر عملکرد سلول‌های تله‌اندازی شده و همچنین عملکرد این سلول‌ها در مقایسه با سلول‌های آزاد در شرایط محیطی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور کلی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که استفاده از سلول‌های تثبیت شده در حذف یا تجزیه زیستی آلاینده‌های آروماتیک علیرغم برخی مشکلات، روشی کارآمد و مؤثر است و با انتخاب حامل پلیمری مناسب براساس شرایط محیطی و نوع آلاینده می‌توان به بازدهی بالا یا کاهش زمان فرایند دست یافت. از طرفی کاربرد سلول‌های تثبیت شده در بیوراکتورها و مقیاس صنعتی به‌دلیل

جدول ۴- کاربرد بیوراکتورهای حاوی سلول‌های تثبیت شده در تجزیه زیستی برخی ترکیبات آروماتیک

مرجع	میزان حذف (درصد)	غلظت اولیه	آلاینده	ماتریس پلیمری	نوع بیوراکتور
(۵۵)	≥ 90	۱۰۰۰ mg/L	فنل	آلژینات	بستر سیال
(۳۴)	۱۰۰	۲۰۰ mg/L	فنل	پلی‌وینیل الکل	بستر فورانی
(۵۶)	۱۰۰	۲۵-۲۰۰ mg/L	۴ و ۲- دی کلرو فنل	پلی‌وینیل الکل	
(۵۷)	≥ 93	۶۸-۲۱۳ mg/L	تولوئن	پلی اتیلن گلیکول- کربن فعال- آلژینات	ستون حبایی
(۳۲)	۷۸-۱۰۰	۴۰، ۶۰ و ۸۰ mM	نفتالین	فوم پلی اورتان	بستر پرشده
(۵۸)	۷۰-۱۰۰	۲۵، ۵۰ و ۷۵ mM	نفتالین	آلژینات	
(۵)	۱۰۰	۱۰۰-۱۶۰۰ mg/L	فنل	فوم پلی اورتان	
(۵۹)	۹۷	۰/۲-۸ mg/L	پنتا کلروفنل	فوم پلی اورتان	
(۳۰)	۹۰	۴۰۰ mg/L	بنزن	فوم پلی اورتان	
	۸۴			پلی‌وینیل الکل- آلژینات	

ترکیبات سمی و خطرناک به محیط زیست جلوگیری نمود.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

References

- Mollaei M, Abdollahpour S, Atashgahi S, Abbasi H, Masoomi F, Rad I, et al. Enhanced phenol degradation by *Pseudomonas* sp. SA01: Gaining insight into the novel single and hybrid immobilizations. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;175:284-92.
- Girish CR, Ramachandra MV. Removal of Phenol from Wastewater in Packed Bed and Fluidised Bed

قابلیت استفاده مجدد آنها و عملکرد مطلوب آنها در دوره‌های زمانی متوالی، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. البته در برخی موارد افزایش زمان تجزیه و محدودیت‌های نفوذی در حامل‌ها، منجر به کاهش راندمان سامانه‌های تثبیت سلولی نیز شده‌اند. اما به‌طور کلی و براساس مطالعات حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از سامانه سلول‌های تثبیت شده جهت زیست سالم‌سازی پساب صنایع مختلف، می‌توان از ورود

- Columns: A Review. *International Research Journal of Environment Sciences*. 2013;2(10):96-100.
- Mohanty SS, Jena HM. Biodegradation of phenol by free and immobilized cells of a novel *Pseudomonas* sp. NBM11. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2017;34(1):75-84.
- Ali O, Namane A, Hellal A. Use and recycling of

- Ca-alginate biocatalyst for removal of phenol from wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2013;19:1384-90.
5. Kotresha D, Vidyasaga GM. Phenol Degradation in a Packed Bed Reactor by Immobilized cells of *Pseudomonas aeruginosa* MTCC 4997. *Biocatalysis and Agriculture Biotechnology*. 2017;10:386-89.
 6. Vidali M. Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry*. 2001;73(7):1163-72.
 7. Patel BP, Kumar A. Multi-substrate biodegradation of chlorophenols by defined microbial consortium. *Biotechnology*. 2016;6(2):191.
 8. Brar SK, Verma M, Surampalli RY, Misra K, Tyagi RD, Meunier N, et al. Bioremediation of Hazardous Wastes—A Review. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 2006;10(2):59-72.
 9. Kafilzadeh F, Khaledi Z. Evaluation of the isolated bacteria from activated sludge of Asalouyeh Special Zone municipal wastewater treatment for bioaugmentation of kerosene contaminated soils. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2016;9(2):211-22 (in Persian).
 10. Nadalian B, Mogadam MS, Ebrahimipour G, Nadalian B. Biodegradation of malathion using mixed culture of *Serratia marcescens* BNA1 and *Pseudomonas aeruginosa* BNA2. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2016;8(4):525-34 (in Persian).
 11. Safari M, Ahmady-Asbchin S, Soltani N. The potential of *Cyanobacterium Schizothrix vaginata* ISC108 in biodegradation of crude oil. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2014;7(3):363-74 (in Persian).
 12. Ashmagh FR, Kalantary RR, Farzadkia M, Jafari AJ, Nabizadeh R. Survey of phenanthrene biodegradation's model in contaminated soils by *Acinetobacter* SP. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2009;2(3):196-203 (in Persian).
 13. Partovinia A, Rasekh B. Review of the immobilized microbial cell systems for bioremediation of petroleum hydrocarbons polluted environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2018;48(1):1-38.
 14. Dzionek A, Wojcieszynska D, Guzik U. Natural carriers in bioremediation: A review. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2016;23:28-36.
 15. Keshavarz T, Nedovic V. In focus: Immobilization editorial, Cell immobilization: Past, present and future prospects. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2006;81:483-84.
 16. Kourkoutas Y, Bekatorou A, Banat IM, Marchant R, Koutinas AA. Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production: a review. *Food Microbiology*. 2004;21:377-97.
 17. Nwankwegu AS, Onwosi CO. Microbial cell immobilization: a renaissance to bioaugmentation inadequacies. A review. *Environmental Technology Reviews*. 2017;6(1):186-98.
 18. Bayat Z, Hassanshahian M, Cappello S. Immobilization of microbes for bioremediation of crude oil polluted environments: A mini review. *The Open Microbiology Journal*. 2015;9:48-54.
 19. Ha J. Biodegradation of the organophosphate pesticide, coumaphos, using microorganisms immobilized in calcium-alginate gel beads [dissertation]. Texas: Texas A&M University; 2005.
 20. Al-Khalid T, El-Naas MH. Aerobic biodegradation of phenols: A comprehensive review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2012;42:1631-90.
 21. Martins SCS, Martins CM, Fiúza LMCG, Santaela ST. Immobilization of microbial cells: A promising tool for treatment of toxic pollutants in industrial wastewater. *African Journal of Biotechnology*. 2013;12(28):4412-18.
 22. Somtrakoon K, Suanjit S, Pokethitiyook P, Kruatrachue M, Cassidy MB, Trevors JT, et al. Comparing phenanthrene degradation by alginate-encapsulated and free *Pseudomonas* sp. UG14Lr cells in

- heavy metal contaminated soils. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2009;84:1660-68.
23. Sarma SJ, Pakshirrajan K. Surfactant aided biodegradation of pyrene using immobilized cells of *Mycobacterium frederiksbergense*. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2011;65:73-77.
 24. Bandhyopadhyay K, Das D, Maiti BR. Solid matrix characterization of immobilized *Pseudomonas putida* MTCC 1194 used for phenol degradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1999;51:891-95.
 25. Wang CC, Lee CM, Lu CJ, Chuang MS, Huang CZ. Biodegradation of 2,4,6-trichlorophenol in the presence of primary substrate by immobilized pure culture bacteria. *Chemosphere*. 2000;41:1873-79.
 26. O'reilly KT, Crawford RL. Degradation of Pentachlorophenol by polyurethane-immobilized *Flavobacterium* cells. *Applied and Environmental Microbiology*. 1989;55(9):2113-18.
 27. Jin X, Tian W, Liu Q, Qiao K, Zhao J, Gong X. Biodegradation of the benzo[a]pyrene-contaminated sediment of the Jiaozhou Bay wetland using *Pseudomonas* sp. immobilization. *Marine Pollution Bulletin*. 2017;117(1-2):283-90.
 28. Chen Y-M, Lin T-F, Huang C, Lin J-C, Hsieh F-M. Degradation of phenol and TCE using suspended and chitosan-bead immobilized *Pseudomonas putida*. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;148:660-70.
 29. Garcia A, Araujo BR, Birolli WG, Marques CG, Diniz LEC, Barbosa AM, Jr., et al. Fluoranthene biodegradation by *Serratia* sp. AC-11 immobilized into chitosan beads. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2019;188(4):1168-84.
 30. Kureel MK, Geed SR, Giri BS, Rai BN, Singh RS. Biodegradation and kinetic study of benzene in bioreactor packed with PUF and alginate beads and immobilized with *Bacillus* sp.-M3. *Bioresource Technology*. 2017;242:92-100.
 31. Mulla SI, Talwar MP, Bagewadi ZK, Hoskeri RS, Ninnekar HZ. Enhanced degradation of 2-nitrotoluene by immobilized cells of *Micrococcus* sp. strain SMN-1. *Chemosphere*. 2013;90:1920-24.
 32. Manohar S, Kim CK, Karegoudar TB. Enhanced degradation of naphthalene by immobilization of *Pseudomonas* sp. strain NGK1 in polyurethane foam. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2001;55:311-16.
 33. Cassidy M, Mullineers H, Lee H, Trevors J. Mineralization of pentachlorophenol in a contaminated soil by *Pseudomonas* sp UG30 cells encapsulated in κ-carrageenan. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 1997;19:43-48.
 34. El-Naas MH, Mourad A-HI, Surkatti R. Evaluation of the characteristics of polyvinyl alcohol (PVA) as matrices for the immobilization of *Pseudomonas putida*. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2013;85:413-20.
 35. Partovinia A, Naeimpoor F. Comparison of phenanthrene biodegradation by free and immobilized cell systems: formation of hydroxylated compounds. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014;21(9):5889-98.
 36. Partovinia A, Naeimpoor F. Application of cell immobilization in slurry-phase bioremediation: Phenanthrene biodegradation and detoxification. In: Bidoia ED, editor. *Toxicity and biodegradation testing*. New York: Springer; 2018. p. 105-21.
 37. Liu YJ, Zhang AN, Wang XC. Biodegradation of phenol by using free and immobilized cells of *Acinetobacter* sp. XA05 and *Sphingomonas* sp. FG03. *Biochemical Engineering Journal*. 2009;44:187-92.
 38. Zouari H, Labat M, Sayadi S. Degradation of 4-chlorophenol by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* in free and immobilized cultures. *Bioresource Technology*. 2002;84:145-50.
 39. Ueno R, Wada S, Urano N. Synergetic effects of cell immobilization in polyurethane foam and use of thermotolerant strain on degradation of mixed hydrocarbon substrate by *Prototheca zopfii*. *Fisheries Science*. 2006;72:1027-33.
 40. Zheng C, Zhou J, Wang J, Qu B, Wang J, Lu H,

- et al. Aerobic degradation of nitrobenzene by immobilization of *Rhodotorula mucilaginosa* in polyurethane foam. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;168:298-303.
41. Siripattanakul S, Khan E. Fundamentals and applications of entrapped cell bioaugmentation for contaminant removal. In: Shah V, editor. *Emerging environmental technologies*. New York: Springer; 2010. p. 147-70.
42. Zhen-Yu W, Ying X, Hao-Yun W, Jian Z, Dong-Mei G, Feng-Min L, et al. Biodegradation of crude oil in contaminated soils by free and immobilized microorganisms. *Pedosphere*. 2012;22(5):717-25.
43. Partovinia A, Naeimpoor F. Phenanthrene biodegradation by immobilized microbial consortium in polyvinyl alcohol cryogel beads. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2013;85:337-44.
44. Kuyukina MS, Ivshina IB, Kamenskikh TN, Bulicheva MV, Stukova GI. Survival of cryogel-immobilized *Rhodococcus* strains in crude oil-contaminated soil and their impact on Biodegradation efficiency. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2013;84:118-25.
45. Patil NK, Veeranagouda Y, Vijaykumar MH, Nayak SA, Karegoudar TB. Enhanced and potential degradation of o-phthalate by *Bacillus* sp. immobilized cells in alginate and polyurethane. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2006;57:82-87.
46. Sharari M, Roohani M, Latibari AJ, Guillet A, Arousseau M, Sharari A. Treatment of bagasse preparation effluent by *Phanerochaete chrysosporium* immobilized on polyurethane foam: Enzyme production versus pollution removal. *Industrial Crops and Products*. 2013;46:226-33.
47. Song SH, Choi SS, Park K, Yoo YJ. Novel hybrid immobilization of microorganisms and its applications to biological denitrification. *Enzyme and Microbial Technology*. 2005;37:567-73.
48. Massalha N, Shaviv A, Sabbah I. Modeling the effect of immobilization of microorganisms on the rate of biodegradation of phenol under inhibitory conditions. *Water Research*. 2010;44:5252-59.
49. Mulla SI, Bangeppagari M, Mahadevan GD, Eqani SAMAS, Sajjan DB, Tallur PN, et al. Biodegradation of 3-chlorobenzoate and 3-hydroxybenzoate by polyurethane foam immobilized cells of *Bacillus* sp. OS13. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016;4:1423-31.
50. Forootanfar H, Shakibaie M, Bagherzadeh Z, Aghaie-Khozani M, Nafissi-Varche N, Monsef-Esfahani HR, et al. The removal of p-chlorophenol in aqueous cultures with free and alginate-immobilized cells of the microalga *Tetraselmis suecica*. *Journal of Applied Phycology*. 2013;25:51-57.
51. Wang X, Gong Z, Li P, Zhang L. Degradation of Pyrene in Soils by Free and Immobilized Yeasts, *Candida tropicalis*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2007;78:522-26.
52. Guibal E. Interactions of metal ions with chitosan-based sorbents: a review. *Separation and Purification Technology*. 2004;38:43-74.
53. Ngah WSW, Teong LC, Hanafiah MAKM. Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2011;83:1446-56.
54. El-Naas MH, Acio JA, Telib AEE. Aerobic biodegradation of BTEX: Progresses and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2014;2:1104-22.
55. González G, Herrera G, García MT, Peña M. Biodegradation of phenolic industrial wastewater in a fluidized bed bioreactor with immobilized cells of *Pseudomonas putida*. *Bioresource Technology*. 2001;80:137-42.
56. Al-Khalid T, El-Naas MH. Biodegradation of 2,4-dichlorophenol. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;10(1):175-91.
57. Song J, Namgung H, Ahmed Z. Biodegradation of toluene using *Candida tropicalis* immobilized on polymer matrices in fluidized bed bioreactors. *Jour-*

- nal of Hazardous Materials. 2012;241-242:316-22.
58. Seoud MA, Maachi R. Biodegradation of Naphthalene by Free and Alginate Entrapped *Pseudomonas* sp. *Zeitschrift für Naturforschung*. 2003;58(9-10):726-31.
59. Damianovic MHRZ, Moraes EM, Zaiat M, Foresti E. Pentachlorophenol (PCP) dechlorination in horizontal-flow anaerobic immobilized biomass (HAIB) reactors. *Bioresource Technology*. 2009;100:4361-67.



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>
Systematic Review Article



Application of immobilized microbial cells in biological treatment of contaminated effluent with aromatic compounds: a review article

A Partovinia^{1,*}, Z Shamsollahi²

1- Biorefinery Engineering Department, Faculty of New Technologies Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Department of Simulation and Designing of Processes, School of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 18 March 2019
Revised: 11 June 2019
Accepted: 16 June 2019
Published: 4 September 2019

Keywords: Aromatic compounds, Bioremediation, Cell immobilization, Entrapment, Polymeric carrier

*Corresponding Author:

a_partovi@sbu.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: Bioremediation of contaminants by living microorganisms is a favorable method for elimination or degradation of pollutants to less harmful substances. In the recent decades, cell immobilization technique has been applied to improve biodegradation efficiency and also overcome to free cells disadvantages. The purpose of this review article is to investigate the application of cell immobilization technology with emphasize on polymeric matrices in the aromatic pollutants removal in laboratory scale (shake flask and bioreactor). Also, the performance of free and immobilized cells has been compared in various environmental conditions.

Materials and Methods: In this survey 401, 78, 49, 1450, 0 and 0 relevant articles were found on Scopus, Web of Science, PubMed, Google scholar, SID and Magiran databases, respectively by using keywords such as “Cell immobilization”, “Biodegradation” and “Aromatic. Out of 1978 articles, 1167 articles were excluded from the study. Finally, 811 articles were further reviewed.

Results: According to the previous studies, removal of contaminants by immobilized cells using appropriate matrices is higher than freely suspended cell systems. Also, among the cell immobilization systems, cell entrapment in the polymeric carriers is the most widely used method for the bioremediation of aromatic contaminants.

Conclusion: Regarding the superiority of immobilized cells in comparison with free cells specially in harsh environments, the reuse of immobilized cells and their application in bioreactors as well as their scale up potential, development and application of these methods can be considered by researchers for wastewater treatment in our country.

Please cite this article as: Partovinia A, Shamsollahi Z. Application of immobilized microbial cells in biological treatment of contaminated effluent with aromatic compounds: a review article. Iranian Journal of Health and Environment. 2019;12(2):273-88.