

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 1
Pages 17-29
ISSN: 2252-0449

Opportunities for Advancement in Biodegradable Biopolymers and Biosurfactants: A Review

Amir Mohamadpour^{1*} and Maryam Seif²

1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources,
Postal Code 3158777871, Karaj, Iran
2. Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Guilan,
Postal Code 4199613776, Rasht, Iran

Received: 1 June 2024, Accepted: 29 December 2024

Abstract

This paper reviews the properties and applications of amphiphilic molecules (surfactants) and biosurfactants, analyzing their roles in improving the environmental pollutant removal processes. Surfactants as a surface-active agent with the ability to reduce surface tension in aqueous and liquid environments are used in various industries, including detergents and cleaners. However, the discharge of these substances into the environment has detrimental consequences such as eutrophication and ecosystem degradation. For this reason, the substitution of chemical surfactants with biosurfactants and biopolymers, which are derived from natural sources and are environmentally safer, has gained attention. In this paper, the combination of biosurfactants with natural biopolymers such as chitosan, alginate and proteins was investigated and their potential for removing surfactants and other pollutants from wastewater is evaluated. The findings indicate that some of these biopolymers, especially chitosan and tannin, are capable of adsorbing high amounts of surfactants. In addition, biosurfactants, with bioactivity and antimicrobial properties, facilitate the optimization of drug delivery and therapeutic processes. In general, this article highlights the importance of biosurfactants and biopolymers in developing sustainable and environmentally friendly methods for wastewater treatment and reducing the destructive effects of pollutants on aquatic ecosystems. and emphasizes the need for further research into innovative technologies to increase the efficiency of these systems in order to optimize cleaning methods and contribute to environmental protection.

Key Words

biopolymer,
surfactant,
biosurfactant,
adsorption,
wastewater treatment

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: amir.mohamadpour@ut.ac.ir

مروری بر فرصت‌های پیشروی انواع زیست‌پلیمرها و زیست‌سطح‌فعال‌های زیست‌تخریب‌پذیر

امیر محمدپور تسیه^{۱*} و مریم سیف^۲

۱- کرج، دانشگاه تهران، پردیس منابع طبیعی، دانشکده صنایع چوب و کاغذ، کد پستی ۳۱۵۸۷۷۷۸۷۱

۲- رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده فنی، گروه مهندسی شیمی، کد پستی ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶

دریافت: ۱۴۰۳/۳/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۹

این مقاله به بررسی خواص و کاربردهای مولکول‌های دوحیط‌دوست (سطح‌فعال‌ها) و زیست‌سطح‌فعال‌ها می‌پردازد و نقش آن‌ها را در بهبود فرایندهای پاک‌سازی محیط‌زیست از آلاینده‌ها تحلیل می‌کند. سطح‌فعال‌ها به‌عنوان عوامل فعال سطحی با قابلیت کاهش کشش سطحی در محیط‌های آبی و مایع در صنایع مختلف از جمله شوینده‌ها و پاک‌کننده‌ها کاربرد دارند. با این حال، تخلیه این مواد به محیط‌زیست عواقب زیان‌باری نظیر بیش‌پروردی و تخریب بوم‌سازگان را به همراه دارد. بدین دلیل، جایگزینی سطح‌فعال‌های شیمیایی با زیست‌سطح‌فعال‌ها و زیست‌پلیمرها مورد توجه قرار گرفته است، زیرا از منابع طبیعی استخراج می‌شوند و از نظر زیست‌محیطی ایمن‌ترند. در این مقاله، ترکیب زیست‌سطح‌فعال‌ها با زیست‌پلیمرهای طبیعی از قبیل کیتوسان، آلژینات و پروتئین‌ها بررسی و قابلیت بالقوه آن‌ها در حذف سطح‌فعال‌ها و سایر آلاینده‌ها از فاضلاب ارزیابی شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند، برخی از این زیست‌پلیمرها، به‌ویژه کیتوسان و تانین قابلیت جذب مقادیر زیادی سطح‌فعال را دارند. افزون‌براین، زیست‌سطح‌فعال‌ها با خواص زیستی و ضد میکروبی، امکان بهینه‌سازی فرایندهای دارورسانی و درمانی را فراهم می‌آورند. به‌طورکلی در این مقاله، اهمیت زیست‌سطح‌فعال‌ها و زیست‌پلیمرها در توسعه روش‌های پایدار و دوستدار محیط‌زیست در تصفیه فاضلاب و کاهش آثار مخرب آلاینده‌ها بر بوم‌سازگان آبی نشان داده شده و بر لزوم پژوهش‌های بیشتر در زمینه فناوری‌های نوآورانه برای افزایش بهره‌وری این سامانه‌ها برای دستیابی به بهینه‌سازی روش‌های پاک‌سازی و کمک به حفاظت از محیط‌زیست تأکید شده است.

بسیار ش
فصلنامه علمی
سال پانزدهم، شماره ۱،
صفحه ۲۹-۱۷، ۱۴۰۴
ISSN: 2252-0449

چکیده



امیر محمدپور تسیه



مریم سیف

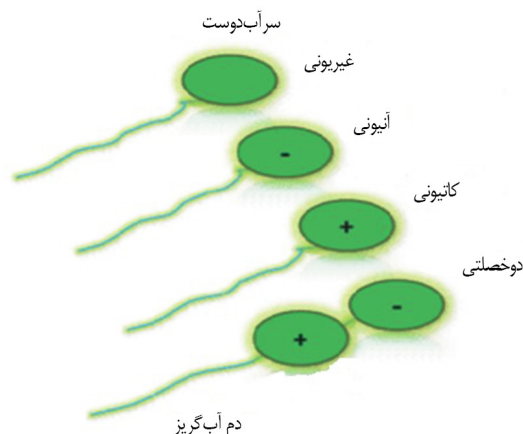
واژگان کلیدی

زیست‌پلیمر،
سطح‌فعال،
زیست‌سطح‌فعال،
برجذب،
تصفیه فاضلاب

مقدمه

مولکول‌های دوحیط‌دوست که قابلیت تشکیل میسل‌ها را دارند، به‌عنوان عامل فعال سطحی یا سطح‌فعال شناخته می‌شوند. فعال بودن سطح این مولکول‌ها سبب شده است که به‌عنوان عوامل امولسیون‌ساز، پاک‌کننده، کف‌زا و مرطوب‌کننده شناخته شوند [۱]. این مولکول‌ها قابلیت آن را دارند تا کشش سطحی محیط‌های آبی مانند هوا-آب، کشش بین‌سطحی محیط‌های مایع-مایع مانند روغن-آب یا آب-روغن یا مایع-جامد را کاهش دهند [۱]. به‌عبارت دیگر، سطح‌فعال‌ها به حل شدن ترکیبات قطبی در حلال‌های آلی کمک می‌کنند. این مولکول‌های فعال سطحی دارای گونه‌های مختلف شیمیایی با یک سر قطبی آب‌دوست و یک دم غیرقطبی هیدروکربنی آب‌گریز هستند [۱]. روزانه، حجم زیادی از سطح‌فعال‌های سنتزی که منشأ شیمیایی دارند، در مصارف خانگی و صنعتی به‌کار برده شده و در نهایت، اغلب باقی‌مانده این مواد به محیط‌های آبی و خاکی تخلیه می‌شوند [۲]. سطح‌فعال‌ها در غلظت‌های کم به‌شکل مونومر در آب حل می‌شوند، اما در غلظت‌های زیادتر به‌شکل میسل تجمع می‌کنند و انرژی آزاد سامانه را کاهش می‌دهند [۲]. غلظتی که در آن اولین دسته از میسل‌ها تشکیل می‌شود، غلظت بحرانی میسل (CMC) گفته می‌شود [۲]. به‌دلیل سر قطبی، آن‌ها را می‌توان به چهار گروه آنیونی (دارای بار منفی)، کاتیونی (دارای بار مثبت)، غیریونی (بدون بار) و دوحصلتی (دارای بار مثبت و منفی) تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱). هر یک از ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی، کاربرد خاصی دارند و قابلیت حذف و پاک‌سازی گونه‌های ویژه‌ای از مواد و روغن‌ها را دارند [۴-۲].

سطح‌فعال‌های آنیونی یکی از رایج‌ترین و قدیمی‌ترین انواع شناخته‌شده هستند که به‌طور عمده در شوینده‌ها مانند صابون، مایع‌های ظرفشویی، پودرهای لباس‌شویی یا در پاک‌کننده‌های آرایشی و بهداشتی استفاده می‌شوند. بنابراین، این دسته از سطح‌فعال‌ها به‌طور رایج در فاضلاب خانگی و شهری یافت می‌شوند. از انواع رایج سطح‌فعال‌های آنیونی می‌توان به سدیم دودسیل سولفات (SDS)، آلکیل سولفات (AS)، سدیم لوریل سولفات (SLS)، آلکیل بنزن سولفونات خطی (LAS) و آلکیل اتوکسی سولفات (AES) اشاره کرد [۲]. بخش آب‌گریز مولکول، اغلب زنجیر آلکیل با طول‌های مختلف، آلکیل فیل اتر یا آلکیل بنزن است و بخش آب‌دوست آن کربوکسیل، سولفات، سولفونات یا فسفات است. آلکیل بنزن سولفونات خطی یکی از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده بسیاری از شوینده‌های خانگی و صنعتی است [۵]. وجود LAS در محیط آبی به اختلال در پایداری غشای سلولی



شکل ۱- نمایی از انواع مختلف سطح‌فعال‌ها [۱].

میتواند در گیاهان و حیوانات منجر می‌شود که در نهایت اختلال در عملکرد سلول را سبب شده و باعث مرگ بافت می‌شود. همچنین، LAS به حل شدن حلال‌های آلی سمی در آب کمک می‌کنند [۵].

استفاده بیش از حد از سطح‌فعال‌ها و تخلیه باقی‌مانده آن‌ها در محیط‌زیست آثار مخرب جدی برجای گذاشته است. به‌عنوان مثال، باقی‌مانده محصولات شوینده که روزانه به مقدار زیادی در محیط‌های آبی تخلیه می‌شوند، حاوی حجم زیادی سطح‌فعال با منشأ فسفات هستند که پدیده مخرب بیش‌پروردی را سبب می‌شود [۶]. پدیده بیش‌پروردی به تولید ناگهانی و بیش از حد جلبک، علف و پلانکتون در محیط‌های آبی منجر می‌شود که اکسیژن محلول در آب را مصرف می‌کنند. کمبود اکسیژن در محیط‌های آبی موجب خفه شدن ماهی‌ها و سایر گیاهان آبی شده که این عمل موجب مرگ و میر و منقرض شدن جانداران آبی می‌شود. کاهش تنوع گونه‌ها، افزایش زیست‌توده گیاهی و جانوری، گل‌آلودی و سرعت رسوب کردن و کوتاه شدن عمر دریاچه از موارد مخرب پدیده بیش‌پروردی به‌شمار می‌آیند [۶].

تمام سطح‌فعال‌ها با روش شیمیایی سنتز می‌شوند و منشأ پتروشیمیایی دارند. بنابراین سمی هستند، زیست‌تخریب‌پذیر نیستند و به‌آسانی تجزیه نمی‌شوند و باید به‌دنبال روش مناسبی بود که یا سطح‌فعال‌ها به‌میزان مؤثری از محیط‌های آلوده حذف شده یا این مواد شیمیایی جایگزین شوند و افزون‌بر کارایی مطلوب، آثار محیط‌زیستی مخرب نداشته باشند. تاکنون، جاذب‌های مختلف مانند کربن فعال، آلومینای خشتی، سیلیکاژل و غیره به‌منظور حذف گونه‌های مختلف سطح‌فعال‌ها از فاضلاب ارزیابی شده است [۵]. امروزه جاذب‌های زیستی، جایگزین روش‌های مرسوم جذب‌شده

جدول ۱- انواع زیست پلیمرها و پلیمرهای زیست تخریب پذیر، مزایا و معایب و نمونه های رایج آن ها [۴۴۴۴].

نوع زیست پلیمر	مزایا	معایب	انواع
طبیعی	تجدیدپذیر زیستی، زیست تخریب پذیر، زیست سازگار، غیرسمی، چسب زیستی، عمدتاً دارای ساختار شاخه دار و بی شکل، درجه پلیمر شدن مطلوب و گروه های عاملی در دسترس	پایداری و دمای ذوب کم، کشش سطحی زیاد و گاهی دارای ساختار پیچیده (لیگنین)	سلولوز، همی سلولوز، لیگنین، کیتین، کیتوسان، نشاسته، ژلاتین، کراتین، کلاژن، آلژینات و تانین
سنتزی	زیست سازگار، بازسازی بیشتر و پایداری مکانیکی و شیمیایی بهتر	پایداری متوسط، سرعت زیست تخریب پذیری کم و هزینه بری فرایند سنتز	پلی لاکتیک اسید، پلی کاپرولاکتون، پلی هیدروکسی بوتیرات، پلی وینیل الکل، پلی هیدروکسی آلکانوات، پلی بوتیلن آدیپات ترفتالات و پلی استر آمید

مروری بر فرصت های پیشروی انواع زیست پلیمرها ...

جدید و دوستدار محیط زیست در علم پلیمر و فناوری های مرتبط را مطرح کند.

زیست پلیمرها

زیست پلیمرها مواد آلی هستند که در منابع طبیعی یافت می شوند. این مولکول های بزرگ از چند واحد تکرار شونده به نام مونومرها تشکیل شده اند. منشأ سازنده آن ها می تواند گیاهی، حیوانی یا میکروبی باشد. به دلیل زیست سازگاری و زیست تخریب پذیری، می توان از این پلیمرهای زیستی به عنوان فیلم های خوراکی، امولسیون ها، بسته بندی مواد در صنایع غذایی و به عنوان مواد حامل دارو، کاشتنه های پزشکی، ترمیم کننده زخم و مواد زخم پوش ها در پزشکی و صنایع دارویی استفاده کرد. این پلیمرهای طبیعی به دو صورت دانه و کامپوزیت یافت می شوند [۵، ۷]. زیست پلیمرها را با توجه به منشأ سازنده آن ها می توان به دو دسته طبیعی و سنتزی تقسیم بندی کرد که در جدول ۱، مزایا، معایب و چند مثال از آن ها آورده شده است [۷].

زیست پلیمرهای طبیعی از پلی ساکاریدها، پروتئین ها و میکروبها ساخته می شوند. در حالی که زیست پلیمرهای سنتزی، پلیمرهایی هستند که از تخمیر میکروبی یا محصولات زیست فناوری و پتروشیمیایی تولید شده اند [۷]. پلی ساکاریدها از مونوساکاریدها (قندها) تشکیل شده که با اتصالات گلیکوزیدی به هم متصل می شوند. از انواع مختلف این زیست پلیمرها می توان به سلولوز، کیتین و کیتوسان، نشاسته، تانین، پکتین، آلژینات، ابریشم، آگار، هیالورونیک اسید، دکسترین و صمغ های مختلف اشاره کرد [۷، ۸]. در شکل ۲ تعدادی از پلیمرهای طبیعی که بیشترین مطالعات درباره آن ها انجام شده و منابع سازنده آن ها نشان داده شده است.

است. زیست پلیمرها موادی هستند که به طور طبیعی از موجودات زنده ساخته می شوند، بنابراین جزء ترکیبات زیست سازگار، دوستدار محیط زیست و پایدار تلقی می شوند. این زیست پلیمرها به عنوان منعقدکننده در تصفیه آب و جذب فلزات سنگین و سایر مواد آلوده مانند رنگ ها، استفاده کرده اند [۵].

به کارگیری زیست پلیمرها به عنوان جاذب سطح فعال ها، ایده جدیدی است که مطالعه آن به طور عمده از یک دهه قبل مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، مطالعات در این زمینه تاکنون کمتر از روش های مرسوم جذب است. هدف این مقاله، بررسی قابلیت های زیست سطح فعال ها و زیست پلیمرها در جذب و حذف سطح فعال های شیمیایی از فاضلاب های آلوده است. با توجه به آسیب های زیست محیطی ناشی از تخلیه سطح فعال های سنتزی، تمرکز بر توسعه راهکارهای پایدار و زیست سازگار برای تصفیه فاضلاب، به ویژه با استفاده از مواد طبیعی و تجدیدپذیر از اهداف اصلی این مقاله است. نوآوری این کار در ارائه ترکیبی از زیست سطح فعال ها و زیست پلیمرها به عنوان سامانه تصفیه کارآمد و پایدار است که می تواند به طور درخور توجهی بر کاهش آلودگی های ناشی از سطح فعال ها اثر بگذارد. همچنین، اثربخشی دقیق انواع مختلف زیست پلیمرها (نظیر کیتوسان و تانین) و زیست سطح فعال ها در فرایند جذب ارزیابی و مقایسه شده و نقاط قوت و ضعف هر یک تحلیل شده است. افزون بر این، سامانه های برپایه ترکیب زیست سطح فعال ها با پلیمرهای طبیعی و سنتزی بررسی شده که به تولید نانوذرات و هیدروژل های جدید منجر می شود. این نانوشکل های جدید، افزون بر عملکرد بهتر در جذب سطح فعال ها، قابلیت بالقوه کاربردی در صنایع دارویی و محیط زیست را دارند. بنابراین، مطالعه حاضر می تواند راهکار

فصلنامه علمی، سال پانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴



شکل ۲- تعدادی از پلیمرهای طبیعی و منابع سازنده آنها [۴۴۴].

سلولوز فراوان‌ترین کربوهیدرات است که به‌عنوان پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر شناخته شده است و در منابع بسیاری از جمله گیاهان یافت می‌شود. سلولوز جزء ترکیبات سازگار با محیط‌زیست است و به انرژی کمی برای تولید نیاز دارد. در ساختار سلولوز، لیفچه‌ها به هم متصل می‌شوند و الیاف سلولوزی را می‌سازند [۸]. کیتین پس از سلولوز، دومین پلی‌ساکارید فراوان است که به مقدار زیادی در دسترس است. کیتین از واحدهای ۲-(استیل آمینو)-۲-داکسی-D-گلوکوز تشکیل شده است. این زیست‌پلیمر نوعی پلی‌ساکارید اسیدی یا خنثی و آب‌گریز بوده و در آب و بسیاری از حلال‌های آلی نامحلول است [۸]. دسته دیگر آمینوپلی‌ساکارید که به مقدار فراوانی در طبیعت یافت می‌شود، کیتوسان است. کیتوسان، مشتق عمده کیتین است که از طریق استیل‌زدایی کیتین ساخته می‌شود. نشاسته پلی‌ساکاریدی قوی است که از آمیلوزهای خطی و از زنجیرهای آمیلوپکتین شاخه‌دار با اندازه $1-100 \text{ nm}$ تشکیل شده است [۸].

تانین نوعی پلیمر آنیونی زیست‌تخریب‌پذیر ارزان‌قیمت است که پس از سلولوز، همی‌سلولوز و لیگنین، جزء فراوان‌ترین ترکیب استخراج‌شده از زیست‌توده، برگ‌ها، ریشه‌ها، پوست درختان، شاخه‌های نازک درختان، دانه‌ها و میوه‌هاست [۹]. به‌طور عمده، تانین را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: یک گروه تانین‌های چگال که مشتقات فلاونول‌ها بوده و گروه دیگر تانین‌های آب‌کافت‌پذیرند که از اترهای یک قند، معمولاً گلوکوز تشکیل شده‌اند [۱۰]. تانین‌های آب‌کافتی را می‌توان با آب داغ یا به کمک آنزیم‌ها به ترکیبات ساده تجزیه کرد. تانین‌های چگال در برابر آلدهیدها فعالیت بیشتری دارند. بدین دلیل در تهیه چسب‌ها و رزین‌ها کاربرد زیادی دارند [۹]. مشتقات پیچیده تانین پلی‌ساکارید، به‌طور عمده در تصفیه پساب و فاضلاب‌های صنعتی استفاده می‌شوند. وجود گروه‌های فنولی در تانین‌ها باعث خاصیت آنیونی آن‌ها شده است

که در نتیجه رزین‌های تانین زیست‌جاذب‌های عالی برای گونه‌های کاتیونی مانند فلزات سنگین، رنگ‌ها و سطح‌فعال‌ها به‌شمار می‌روند [۹]. آلزینات، نوعی پلی‌ساکارید خطی است که از علف‌های دریایی استخراج می‌شود. این پلیمر از β -D-مانورونات (دسته M) و α -1-گلوورونات (دسته G) ساخته شده است [۵]. هر واحد شامل یک گروه عاملی کربوکسیلات است که به‌دام انداختن سطح‌فعال‌های کاتیونی را ممکن می‌کند. به دلیل ویژگی‌های زیست‌سازگاری و غیرسمی، به‌طور عمده در صنایع غذایی کاربرد دارد. در تصفیه فاضلاب، آلزینات عمده‌تاً به‌صورت دانه ساخته می‌شود که این عمل معمولاً از طریق اتصال عرضی با یون‌های کلسیم است [۵].

پروتئین‌ها، مولکول‌های زیستی بزرگی هستند که از یک یا چند زنجیره آمینواسید بلند تشکیل شده‌اند. پروتئین‌ها را بر مبنای منشأ سازنده آن‌ها می‌توان به دو دسته پروتئین‌های حیوانی (مانند کلاژن، ژلاتین، ابریشم، کراتین، کازئین و پروتئین آب‌پنیر) و پروتئین‌های گیاهی (مانند گلوتن، ژئین و پروتئین سویا) تقسیم کرد [۸]. کلاژن، فراوان‌ترین پروتئین موجود در طبیعت است که در غضروف‌ها، تاندون‌ها، استخوان‌ها، پوست و اتصال‌دهنده‌های بافت‌ها یافت می‌شود. ویژگی‌های مطلوبی از جمله زیست‌تخریب‌پذیری، جذب آب، استحکام مکانیکی زیاد، زیست‌سازگاری و قابلیت شبکه‌ای شدن سبب شده است که به‌عنوان حامل مولکول‌های زیست‌فعال و مهندسی بافت کاربرد داشته باشد. ژلاتین یک پروتئین محلول در آب است که از طریق آب‌کافت جزئی یا کنترل‌شده پروتئین انحلال‌ناپذیر، کلاژن تولید می‌شود. این زیست‌پلیمر که شامل گروه‌های عاملی OH ، NH_2 و COOH است در تولید زیست‌کامپوزیت‌ها کاربرد دارد. همچنین، ژلاتین به دلیل ویژگی‌هایی از جمله فراوانی، زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری، خاصیت تشکیل فیلم، قابلیت ژل شدن، حامل گاز عالی و اقتصادی بودن به‌عنوان زیست‌پلیمر پرکاربرد شناخته شده است [۸].

فیبروئین ابریشم نوعی پروتئین طبیعی است که از کرم ابریشم cocoon استخراج می‌شود. این زیست‌مولکول از آلانین، گلیسین و سریسین تشکیل شده است. سریسین در زخم‌پوش‌ها و سایر مواد پزشکی استفاده می‌شود [۸]. پروتئین سویا محصول جانبی روغن دانه سویاست که بیش از ۹۰٪ پروتئین دارد. پروتئین سویا، زیست‌پلیمری است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای پلیمرهای بر پایه نفت باشد [۸]. پلی‌لاکتیک اسید (PLA)، نوعی زیست‌پلیمر سنتزی است که با توجه به ویژگی‌های مطلوب آن از جمله شفافیت و استحکام زیاد می‌تواند جایگزین مناسبی برای پلیمرهای متداول باشد. این پلی‌استر آلیفاتیک آب‌گریز به دلیل خاصیت

جدول ۲- تعدادی از زیست‌پلیمرهای مطالعه‌شده در جذب سطح‌فعال‌ها و بیشینه ظرفیت جذب آن‌ها.

مرجع	بیشینه ظرفیت جذب (mg/g)	جاذب زیست‌پلیمری	سطح‌فعال
۱۱	۸۹۹ ۷۴۰	کامپوزیت دانه‌های کیتوسان خیس کامپوزیت دانه‌های کیتوسان خشک‌شده به روش انجمادی	آلکیل بنزین سولفونات خطی (LAS)
۱۲	۷۱۴	فیلم‌های کیتوسان شبکه‌ای‌شده	سدیم دودسیل بنزن سولفونات (SDBS)
۱۳	۱۳۰۰	هیدروژل دانه‌های کیتوسان	سدیم دودسیل سولفات (SDS)
۱۴	۶۰۹	دانه‌های منیزیم آلزینات	کلرید ستیل پیریدینیوم (CPC)
۱۵	۱۱۰۰۰	الیاف سلولوزی	سطح‌فعال‌های کاتیونی
۱۶	-	سطوح سلولوزی	سطح‌فعال‌های غیریونی
۱۷	۹۶۰	تانین استخراج‌شده از اقاقای مرنسی وحشی ^۲	SDBS

^۱ واحد این کمیت $\mu\text{mol/g}$ است، ^۲ wild Acacia mearnsii.

Rhodococcus) و آرتروباکتر (*Arthrobacter*) و قارچ‌هایی از جمله تورولوپسیس (*Torulopsis*) و کاندیدا (*Candida*) قابلیت تولید زیست‌سطح‌فعال‌ها را دارند [۳]. زیست‌سطح‌فعال‌ها می‌توانند منشأ گیاهی نیز داشته باشند. زیست‌سطح‌فعال‌های مشتق از گیاه، شامل ساپونین‌ها، فسفولیپیدها و پروتئین‌ها یا آب‌کافت پروتئین‌ها، به علت ویژگی‌های زیستی و فیزیکی-شیمیایی نقش‌های زیست‌فناورانه زیادی دارند [۱۸]. بخش قطبی یک زیست‌سطح‌فعال می‌تواند اسید آمینه، کربوهیدرات و پپتید آنیونی یا کاتیونی باشد. درحالی‌که بخش غیرقطبی از زنجیرهای کربنی اشباع یا غیراشباع تشکیل شده است که شامل پروتئین‌ها، اسیدهای چرب یا پپتیدهاست [۳]. پژوهش‌ها نشان داده است، زیست‌سطح‌فعال‌های آنیونی برای فرایندهای پاک‌سازی و حذف روغن مؤثرترند، درحالی‌که زیست‌سطح‌فعال‌های کاتیونی برای امولسیون‌سازی محصولات مراقبت از پوست و زیست‌سطح‌فعال‌های غیریونی برای شوینده‌های در دماهای کم مناسب‌ترند [۱۹]. بنابراین، هر یک از زیست‌سطح‌فعال‌ها دارای ویژگی منحصربه‌فردی بوده که می‌تواند در صنایع مختلف به کار برده شوند.

گلیکولیپیدها، لیپوپپتیدها، فسفولیپیدها، اسیدهای چرب، لیپیدهای خنثی، سطح‌فعال‌های پلیمری، پلی‌ساکاریدها، لیپوبلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و لیپوپروتئین‌ها انواع گوناگون ساختار شیمیایی زیست‌سطح‌فعال‌ها هستند که توسط ریزاندامگان‌ها در محیط‌های حلال (کربوهیدرات‌ها) و غیرحلال (هیدروکربن‌ها، روغن‌ها و بقایای روغنی) کشت می‌شوند [۳]. در جدول ۳، انواع مهم زیست‌سطح‌فعال‌ها و گونه‌های سازنده آن‌ها آورده شده است [۱]. رامنولیپیدها یکی از کاربردی‌ترین زیست‌سطح‌فعال‌ها هستند که توسط باکتری سودوموناس آرتزینوزا تولید شده و جزء دسته

زیست‌تخریب‌پذیری، تجدیدپذیری، بازیافت‌پذیری و خواص چشمگیر مکانیکی می‌تواند قابلیت‌های عالی در صنایع مختلف از جمله نساجی، بسته‌بندی و زیست‌پزشکی داشته باشد [۸]. پلی‌هیدروکسی آلکانوات (PHA) تنها گونه ساخته‌شده از تخمیر میکروبی قندها یا لیپیدهاست که جزء دسته دیگری از پلیمرهای سنتزی پرکاربرد محسوب می‌شود. این پلیمر، به دلیل ویژگی‌هایی از جمله آب‌گریزی، زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری و گرمانرمی در صنعت دارویی و مهندسی بافت کاربرد دارد [۸]. پلی‌بوتیلن سوکسینات، پلی‌وینیل الکل، پلی‌گلیکولیک اسید و پلی‌کاپرولاکتون دسته دیگری از زیست‌پلیمرهای سنتزی هستند، باین تفاوت که از مشتقات نفتی تولید می‌شوند [۸]. مطالعات نشان داده است از میان زیست‌پلیمرهای بررسی‌شده، تعدادی مانند کیتوسان، آلزینات، نشاسته، سلولوز، تانین و پکتین قابلیت کاربرد در تصفیه فاضلاب و حذف سطح‌فعال را دارند [۵]. در جدول ۲، فهرستی از زیست‌پلیمرهای بررسی‌شده به‌عنوان جاذب سطح‌فعال از محیط‌های آبی تاکنون به همراه بیشینه ظرفیت جذب آن‌ها گزارش شده است.

زیست‌سطح‌فعال‌ها

زیست‌سطح‌فعال‌ها مولکول‌های دو محیط‌دوست هستند که از یک سر قطبی (آب‌دوست) و یک سر غیرقطبی (آب‌گریز) تشکیل شده‌اند که به‌طور عمده از طریق فرایندهای تخمیر باکتری‌ها، مخمرها یا قارچ‌های رشته‌ای ساخته می‌شوند [۱۸]. ریزاندامگان مختلف از جمله سودوموناس آرتزینوزا (*Pseudomonas aeruginosa*)، باسیلوس سوبتیلیس (*Bacillus subtilis*)، کورینه‌باکتریوم (*Corynebacterium*)، نوکاردیا (*Nocardia*)، رودوکوکوس

جدول ۳- انواع رایج زیست سطح فعال ها و منشأ تولید آن ها [۴۴۴۴].

ریزاندامگان	زیست سطح فعال		
	دسته	زیر گروه	گروه
سودوموناس، به ویژه سودوموناس آئروژینوزا	رامنولیپیدها	گلیکولیپیدها	با وزن مولکولی کم
تورولوپسیس بامبیکولا و گیلیاملا آپیکولا	سوفورولیپیدها		
رودوکوکوس اریتروپولیس و مایکوباکتریوم	ترهالولیپیدها		
اوستیلاگوزی و اوستیلاگو میداس	سلویولیپیدها		
باسیلوس سوبتیلیس	سورفکتین	لیوپتیدها و لیوپروتئین ها	
سودوموناس فلئوئورسانس	ویسکوزین		
باسیلوس لیکنی فورمیس	پتید-لیپید		
کورینه باکتریوم لپوس	اسیدهای چرب	اسیدهای چرب، لیپیدهای خنثی و فسفولیپیدها	
رودوکوکوس اریتروپولیس با پایانه N	لیپیدهای خنثی		
تیوباسیلوس تیواکسیدانز	فسفولیپیدها		
اسیتوباکتر کالکواستیکوس	زیست امولسیون ساز	زیست سطح فعال های پلیمری	با وزن مولکولی زیاد
اسیتوباکتر کالکواستیکوس	زیست پراکنه		
اسیتوباکتر پرتومقاوم	آلاسان		
کاندیدا لیپولیتیکا	لیپوسان		
آسیتوباکتر کالکواستیکوس	وزیکول ها و فیمبریا ^۱	سطح فعال های ذره ای	
گونه های مختلف باکتری	تمام سلول ها		

fimbriae^۱

زیست سطح فعال ها قابلیت کاهش کشش سطحی آب را از mM/m ۷۲ تا mM/m ۳۵ دارند. متوسط وزن مولکولی زیست سطح فعال ها از ۵۰۰ Da تا ۱۵۰۰ Da متغیر است [۴]. زیست سطح فعال ها با وزن مولکولی کمتر در کاهش کشش سطحی در حد فاصل آب-هوا و کشش بین سطحی روغن-آب مؤثرترند. درحالی که زیست سطح فعال های با وزن مولکولی بیشتر برای استحکام بخشی به امولسیون های روغن در آب استفاده می شوند [۴]. ساختار دوحیط دوست و ویژگی های زیست سطح فعال ها امکان استفاده از آن ها را به عنوان شوینده، پراکنه، امولسیون ساز، عامل جذب و حل کننده در صنعت نفت و حوزه محیط زیست، داروسازی، آرایشی، صنایع غذایی، کشاورزی و نساجی را فراهم می کند [۲۳-۲۵]. در صنعت غذایی، زیست سطح فعال ها به عنوان امولسیون ساز برای بهبود بافت غذاها استفاده می شوند [۲۰]. در صنعت داروسازی، زیست سطح فعال ها می توانند به ازبین بردن سلول های سرطانی کمک کنند و به عنوان جایگزین مؤثری برای داروهای سنتزی شیمیایی به کار برده شوند [۲۰]. از آنجاکه این ترکیبات به سلول های پوستی آسیبی نمی زنند، می توان از زیست سطح فعال ها در

گلیکولیپیدها هستند. سر غیرقطبی این ترکیبات یک زنجیر اسید چرب بوده و سر قطبی آن از نوعی قند به نام رامنوز ساخته شده است. رامنولیپیدها به دلیل وجود گروه کربوکسیلیک اسید آزاد، جزء دسته زیست سطح فعال های آنیونی محسوب می شوند [۲۰]. دسته دیگری از زیست سطح فعال ها، انواع پلیمری هستند که شناخته شده ترین آن ها آلاسان (Alasan)، لیپوسان (Liposan)، لیپومانان (Lipomannan)، امولسان (Emulsan) و کمپلکس های پروتئین پلی ساکارید هستند [۲۱، ۲۲]. امولسان یک عامل امولسیون ساز مؤثر برای هیدروکربن ها در آب است که حتی در غلظت های کم ۰/۰۱-۰/۰۰۱، درصد کارایی دارد. این مولکول از اسیتوباکتر کالکواستیکوس ساخته می شود. لیپوسان نوعی امولسیون ساز است که در آب حل می شود و شامل ۸۳٪ کربوهیدرات و ۱۷٪ پروتئین است. این زیست سطح فعال از بخش خارج سلولی کاندیدا لیپولیتیکا ساخته می شود. کاربرد لیپوسان به عنوان امولسیون ساز در صنایع غذایی و زیبایی شناخته شده است. آلاسان نوعی امولسیون ساز قوی است که از اسیتوباکتر پرتومقاوم تولید می شود. این زیست مولکول کمپلکسی از آلانین، پلی ساکاریدها و پروتئین هاست [۲۲].

محصولات آرایشی استفاده کرد [۲۶]. همچنین، زیست‌سطح‌فعال‌ها در امولسیون‌ساز و حل شدن رنگ‌ها و رنگ‌دانه‌ها و چسبندگی پارچه‌ها در صنعت نساجی دخالت دارند.

این مولکول‌های طبیعی می‌توانند در تولید نانوذرات [۲۰، ۲۷] و در فرایندهای ضدزنگ، جلوگیری از تشکیل رسوب و تشکیل زیست‌فيلم در سطوح فلزی به کار برده شوند [۲۸، ۲۹]. همچنین، ترکیبات مزبور می‌توانند حمل نفت سنگین در خطوط لوله‌ها را آسان کنند که این خود می‌تواند کاربرد نوآورانه در صنعت نفت باشد [۳۰]. با وجود اینکه زیست‌سطح‌فعال‌ها نسبت به سطح‌فعال‌های شیمیایی مزایای چشمگیری از جمله زیست‌تخریب‌پذیری، سمیت کمتر، تجزیه‌پذیری بیشتر، پایداری بیشتر در برابر تغییرات شدید دما، سازگاری بیشتر با محیط‌زیست دارند، کاربرد آن‌ها در مقیاس بزرگ مقرون به صرفه نیست. بنابراین، نیاز است که تدابیری برای بهبود بازده و کاهش هزینه‌های تولید این ترکیبات ارزشمند ارائه شود. در سال‌های اخیر، استفاده از مایعات یونی در فرمول‌بندی زیست‌سطح‌فعال‌ها به دلیل سمیت کم، عدم بخارشدگی، پایداری گرمایی و فعالیت سطحی زیاد توجه بسیاری را جلب کرده است [۳۱]. همچنین، استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی به عنوان محیط کشت مواد غذایی برای ریزاندامگان تولیدکننده سطح‌فعال و نوترکیبی ژنتیکی به نحوی که ریزاندامگان بتوانند حجم بیشتری از این ترکیبات طبیعی را تولید کنند، روش‌های دیگری است که مطالعه شده‌اند [۳۲]. پیشنهاد شده است، برای افزایش کارایی زیست‌سطح‌فعال‌های تولیدشده با منشأ ریزاندامگان، ترکیبی از محیط کشت، مانند روغن‌های گیاهی و روغن‌های مصرفی دورریز استفاده شود [۳۳].

سامانه زیست‌سطح‌فعال-پلیمر

ترکیب زیست‌سطح‌فعال‌ها و پلیمرها به تولید مواد پیشرفته در صنایع مختلف منجر می‌شود. چند مطالعه در زمینه کاربرد گونه‌های مختلف گلیکولیپید در اتصال با پلیمرهای سنتزی و طبیعی، انجام شده است. گلیکولیپیدها دسته‌ای از زیست‌سطح‌فعال‌های با وزن مولکولی کم هستند که دارای بخش کربوهیدراتی آب‌دوست مانند گلوکوز، مانوز، گالاکتوز و غیره هستند [۳۴]. بخش آب‌دوست به یک زنجیر اسید چرب آب‌گریز با پیوند α -۱-گلیکوزیدی متصل می‌شود. این‌ها می‌توانند از منابع مختلف اسیدهای چرب به عنوان ضایعات صنایع یا ضایعات حاصل از روغن‌های سرخ‌کردنی دورریز تهیه شوند. در میان گونه‌های مختلف گلیکولیپیدها، پژوهش‌های زیادی دربارهٔ رامنولیپیدها و سوفورولیپیدها (sophorolipids) انجام

شده است. سر آب‌دوست رامنولیپیدها را یک یا دو گلوکوز رامنوز تشکیل می‌دهد. دم چربی‌دوست آن‌ها به‌طور معمول از زنجیرهای اسید چرب بتا‌هیدروکسی تشکیل شده که شامل زنجیرهای کربنی مختلف است. باکتری سودوموناس آئروژینوزا از باکتری‌های رایج در تولید گونه‌های مختلف رامنولیپیدهاست. بیش از ۶۰ گونهٔ مختلف رامنولیپید با تغییر اسیدهای چرب و گلوکوزهای آب‌دوست گزارش شده است [۳۵]. گونهٔ پرکاربرد دیگر گلیکولیپیدها، سوفورولیپیدها هستند که به‌طور معمول محصول مخمر غیربیماری‌زای استارمارلا بامبیکولا (*Starmarella bombicola*) هستند. سوفورولیپیدها می‌توانند ساختار بسته و باز حلقوی با گلوکوز سوفوروز داشته باشند که سر آب‌دوست زیست‌سطح‌فعال را تشکیل می‌دهد. زنجیر اسید چرب این گونه زیست‌مولکول‌ها، زنجیر اشباع یا غیراشباع کربنی C_{16} - C_{18} است. افزون‌بر اسیدهای چربی که حاصل ضایعات روغنی است، اسیدهای چرب مختلف دیگری مانند اولئیک اسید، استئاریک اسید، پالمیتیک اسید و لینولئیک اسید می‌توانند سر آب‌گریز سوفورولیپیدها را تشکیل دهند [۳۶].

در میان انواع مختلف پلیمرهای طبیعی، چند گونه از جمله فیبروئین ابریشم، کیتوسان، آلژینات، ژلاتین، زئین، کربوکسی‌متیل سلولوز در اتصال با مولکول‌های زیست‌سطح‌فعال مطالعه شده‌اند [۳۷]. همچنین، پلیمرهای سنتزی مانند پلی (لاکتیک-کو-گلیکولیک اسید) و پلی اتیلن گلیکول در اتصال با این زیست‌مولکول‌ها از جمله رامنولیپیدها بررسی شده‌اند. در مطالعات دیگری، کارایی آمیختهٔ پلیمرهای سنتزی و زیست‌سطح‌فعال‌ها بررسی شده است. این سامانه‌ها شکل‌های مختلف از جمله هیدروژل‌ها، نانوذرات، نانوفرمول‌بندی‌ها، فیلم‌ها و نانوالیاف را دربرمی‌گیرند. تشکیل این سامانه‌ها از طریق برهم‌کنش ثانویه بین گونه‌های مختلف زیست‌سطح‌فعال‌ها و پلیمرها ناشی می‌شود. این سامانه‌ها به‌طور عمده کاربردهای مختلفی در زمینه‌های زیست‌دارو، داروسازی و دارورسانی دارند [۳۷]. در جدول ۴، چند سامانه گلیکولیپیدها و پلیمرها، محصول تولیدشده و کاربرد آن‌ها درج شده است.

دستهٔ دیگری از مولکول‌ها، لیپوپتیدها هستند که در آن‌ها زنجیر پپتیدی از طریق پیوند کووالانسی به یک لیپید یا اسید چرب متصل شده است [۴۴]. جزء پپتیدی لیپوپتیدها از آمینواسیدهایی از دسته‌های پروتئینی، تشکیل شده است. از سوی دیگر، بخش لیپیدی خاصیت چربی‌دوستی دارد که سبب برهم‌کنش لیپوپتیدها با غشاهای زیستی می‌شود. طبیعت دو محیط‌دوست و قابلیت برهم‌کنش با غشاهای سلولی سبب شده است که از این مولکول‌ها به‌عنوان دارورسان استفاده شود [۴۴]. در جدول ۵، سامانه‌های

جدول ۴- سامانه‌های گلیکولیپیدها و پلیمرها، محصولات تولیدشده و کاربرد آن‌ها.

زیست‌سطح‌فعال	پلیمر	محصول	کاربرد	مرجع
لوریک اسید و سوفورولیپید	فیبروئین ابریشم	هیدروژل	جایگزین هیدروژل‌های ساخته‌شده با سطح‌فعال‌های شیمیایی برای کاربرد در مهندسی بافت	۳۸
اولئیک اسید و سوفورولیپید	پلی (لاکتیک-کو-گلیکولیک اسید) و DSPE-PEG	سامانه نانوذرات چندکاربردی	فرمول‌بندی دهانی با کاربرد جلوگیری از دگرنشینی ^۱ سرطان سینه	۳۹
رامنولیپید	آلژینات	هیدروژل	بررسی فرایند زیست‌کانی‌سازی در زیست‌فیلم‌ها	۴۰
رامنولیپید	کیتوسان و پلی‌متالیک اسید	نانوذرات	فعالیت ضدباکتری در برابر هلیکوباکتر پیرولی و زیست‌فیلم‌های آن	۴۱
سوفورولیپید و رامنولیپید	کیتوسان	فرمول‌بندی آبی	فرمول‌بندی دهان‌شویه ضد میکروب	۴۲
سوفورولیپید اسیدی	هیالورونیک اسید	فرمول‌بندی نرم‌کننده و پاک‌کننده	شامپوی فری‌سولفات و فری‌سیلیکون نرم‌کننده	۴۳

meta-stasis^۱

زمینه ترکیب آن‌ها با پلیمرهای طبیعی و سنتزی انجام شده است [۳۷]. در جدول ۶ به چند سامانه سورفکتین و پلیمرها، محصولات و کاربرد آن‌ها اشاره می‌شود.

قابلیت ذاتی زیست‌سطح‌فعال‌ها و زیست‌پلیمرها در تشکیل میسل‌هایی با شکل‌های گوناگون به تولید ساختارهایی با اندازه، هندسه و عملکرد خاص منجر شده است. این ویژگی سبب شده است تا مطالعات زیادی در زمینه کاربرد آن‌ها در فرایند دارورسانی انجام شود [۳۷]. همچنین، در فرایند دارورسانی با استفاده از سامانه زیست‌سطح‌فعال-پلیمر، چالش‌های مربوط به حلالیت دارو و پایداری کاسته می‌شود. ویژگی‌های خاص زیست‌سطح‌فعال‌ها و پلیمرها از جمله قابلیت آن‌ها در تولید میسل و ایجاد سامانه پایدار، موجب پژوهش‌های گسترده‌ای در این زمینه شده است. زیست‌سطح‌فعال‌ها به دلیل شباهت ساختار آن‌ها با غشاهای سلولی، خاصیت ضد میکروبی دارند. مطالعات متعددی درباره بررسی خاصیت ضد میکروب هیدروژل‌های متشکل از سوفورولیپیدها،

زیست‌سطح‌فعال‌های لیپیدی و پلیمرها، محصولات تولیدشده و کاربرد آن‌ها آورده شده است.

سورفکتین‌ها، زیرمجموعه‌ای از زیست‌سطح‌فعال‌های لیپوپتیدی است که از باکتری باسیلوس اس‌پی‌پی (*Bacillus spp*) تولید می‌شوند [۴۹]. مولکول سورفکتین از پپتیدهای کوتاه که شامل ۷ آمینواسید و یک زنجیر طولانی اسید چرب با ۱۶-۱۳ کربن ساخته شده است. از یک سو، خاصیت دومیحیط‌دوستی آن‌ها موجب کاهش کشش سطحی ساختارهای نانویی می‌شود. از سوی دیگر، به دلیل کم بودن غلظت بحرانی میسل، می‌توان از این دسته از مولکول‌ها در علوم زیست‌پزشکی و بازایی روغن بهره برد. ویژگی امولسیون‌ی سبب شده است تا این زیست‌مولکول‌ها در صنعت زیبایی و دارویی استفاده کنند. همچنین، از آنجاکه این مولکول‌ها خاصیت زیست‌فعالی از جمله ضدباکتری، ضدسرطان و ضد ویروس دارند، می‌توانند گزینه‌های خوبی در زمینه زیست‌پزشکی باشند [۴۹]. به‌منظور افزایش کاربرد این دسته از مولکول‌ها، مطالعات زیادی در

جدول ۵- سامانه‌های زیست‌سطح‌فعال‌های لیپیدی و پلیمرها، محصولات تولیدشده و کاربرد آن‌ها.

زیست‌سطح‌فعال	پلیمر	محصول	کاربرد	مرجع
لیپوپلی ساکاریدها	کیتوسان	کمپلکس‌های لیپوپلی ساکارید-کیتوسان	درمان عفونت‌های باکتریایی	۴۵
لیپوپتیدها	پلی‌وینیل الکل	غشای برپایه پلی‌وینیل الکل همراه با نانوذرات لیپوپتیدی و روی	آغشته‌سازی ضد میکروبی در کاربردهای پزشکی	۴۶
لیپوپلی ساکاریدها	کیتوسان	نانوذرات	روش جایگزین درمان بیماری وبا	۴۷
لیپوپتید حلقوی	آلژینات	فیلم‌ها	ضدقارچ	۴۸

جدول ۶- سامانه‌های سورفکتین و پلیمرها، محصولات تولیدشده و کاربرد آن‌ها.

زیست‌سطح فعال	پلیمر	محصول	کاربرد	مرجع
سورفکتین	ژلاتین متاکریلات	هیدروژل	معالجه زخم‌های دیابتی	۲۵
سورفکتین	کیتوسان	هیدروژل	ضدقارچ در حفاظت گیاه	۵۰
سورفکتین	پلی‌وینیل الکل	نانوالیاف	خاصیت ضدچسبندگی	۵۱
رامنولپیدها و سورفکتین	پلی‌استیرن	نانوکامپوزیت‌ها: پلی‌استیرن و کلسیم سولفات	پرکننده‌های پزشکی	۵۲

اولئیک اسید و فیبروئین ابریشم انجام شده است. همچنین در پژوهشی، خاصیت ضدچسبندگی، ضدقارچ و ضد میکروب حاصل از سامانه ترکیبی سورفکتین-پلیمر مطالعه شده است. مطالعات نشان داده است، سامانه‌های سوفورولپید-سریسین و سوفورولپید-لیگنین خاصیت ضد میکروب در برابر انواع میکروب‌ها را دارند، بنابراین می‌توانند به عنوان درمان‌کننده زخم به کار برده شوند [۳۷].

نتیجه‌گیری

با وجود مزایای چشمگیر زیست‌سطح فعال‌ها نسبت به سطح فعال‌های شیمیایی از جمله زیست‌تخریب‌پذیری، سمیت کمتر، تجزیه‌پذیری و پایداری بیشتر در برابر تغییرات شدید دمایی و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست، کاربرد آن‌ها در مقیاس بزرگ مقرون به صرفه نیست. بنابراین نیاز است، تدابیری برای بهبود بازده و کاهش هزینه‌های تولید این ترکیبات ارزشمند ارائه شود. از آنجاکه تمام سطح فعال‌ها با روش شیمیایی سنتز می‌شوند و منشأ پتروشیمیایی دارند، سمی هستند، قابلیت زیست‌تجزیه نداشته و به آسانی تجزیه نمی‌شوند. باید به دنبال روش مناسبی بود که یا سطح فعال‌ها به میزان مؤثری از محیط‌های آلوده حذف شود یا جایگزین این مواد شیمیایی باشد. افزون بر کارایی مطلوب و آثار محیط‌زیستی مخرب نداشته باشد. به کارگیری زیست‌پلیمرها به عنوان جاذب سطح فعال‌ها یک ایده جدید است. زیست‌سطح فعال‌ها به عنوان جایگزین مناسبی برای سطح فعال‌های شیمیایی مورد توجه است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد، از میان زیست‌پلیمرهای بررسی شده، تعدادی از آن‌ها مانند کیتوسان، آلژینات، نشاسته، سلولوز، تانین و پکتین قابلیت کاربرد در تصفیه فاضلاب و حذف سطح فعال را دارند. همچنین، زیست‌سطح فعال‌ها قابلیت آن را دارند تا کشش سطحی آب را از 72 mN/m تا 35 mN/m کاهش دهند. متوسط وزن مولکولی زیست‌سطح فعال‌ها از 500 Da تا 1500 Da متغیر

است. زیست‌سطح فعال‌ها با وزن مولکولی کمتر در کاهش کشش سطحی در حد فاصل آب-هوا و کشش بین سطحی در روغن-آب مؤثرترند. درحالی‌که زیست‌سطح فعال‌های با وزن مولکولی بیشتر برای استحکام بخشی به امولسیون‌های روغن در آب استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، سطح فعال‌های شیمیایی سمی هستند، زیست‌تخریب‌پذیر نیستند و مصرف زیاد آن‌ها موجب آسیب جدی به محیط‌زیست می‌شود. به طور عمده، باقی‌مانده محصولات سطح فعال در محیط‌های آبی و خاکی تخلیه می‌شوند و بوم‌سازگان آن‌ها را مختل می‌کنند. سطح فعال‌ها به طور معمول در صنایع مختلف به عنوان عامل پاک‌کننده، کف‌کننده، امولسیون‌ساز و مرطوب‌کننده کاربرد دارند. این ترکیبات شیمیایی توسط موجودات زنده تجزیه‌پذیر نیستند، سمی هستند و اغلب مواد آلاینده ثانویه تولید می‌کنند. به منظور کاهش اثر مخرب این آلاینده‌های شیمیایی، حذف آن‌ها از پساب خانگی و صنعتی ضروری به نظر می‌رسد. همچنین با یافتن ترکیبات جایگزین زیست‌تخریب‌پذیر و مؤثر می‌توان مقدار مصرفی سطح فعال‌های شیمیایی در صنایع مختلف را به حداقل رساند. زیست‌پلیمرها مانند کیتوسان، آلژینات، تانین و غیره می‌توانند جایگزین مؤثر جاذب‌های مرسوم مانند سیلیکا، آلومینا و کربن فعال در جذب سطح فعال‌های شیمیایی در فاضلاب خانگی و صنعتی شوند. از سوی دیگر، زیست‌سطح فعال‌ها با دارا بودن خواص مورد نیاز در قالب تولید شوینده‌ها، به عنوان جایگزین مناسب سطح فعال‌های شیمیایی شناخته شده‌اند. در نتیجه، در کاهش پدیده بیش‌پروردی نقش دارند که یکی از عمده‌ترین مشکلات پساب کارخانه‌های تولید شوینده و پساب خانگی است. شناسایی و کاربرد این ترکیبات کارآمد از اهمیت برجسته‌ای برخوردار است که می‌تواند با پژوهش و توسعه آن در آزمایشگاه و سپس در مقیاس تجاری و صنعتی در قالب شرکت‌های دانش‌بنیان نقش اثرگذاری در تولید محصولات با اهمیت و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی داشته باشد.

مراجع

- De S., Malik S., Ghosh A., Saha R., and Saha B., A Review on Natural Surfactants, *RSC Adv.*, **5**, 65757-65767, 2015.
- Ivanković T. and Hrenović J., Surfactants in the Environment, *Arh. Hig. Rada Toksikol.*, **61**, 95-109, 2010.
- Eras-Muñoz E., Farré A., Sánchez A., Font X., and Gea T., Microbial Biosurfactants: A Review of Recent Environmental Applications, *Bioengineered*, **13**, 12365-12391, 2022.
- Sarubbo L.A., Maria da Gloria C.S., Durval I.J.B., Bezerra K.G.O., Ribeiro B.G., Silva I.A. et al., Biosurfactants: Production, Properties, Applications, Trends, and General Perspectives, *Biochem. Eng. J.*, **181**, 108377, 2022.
- Biswas S. and Pal A., Application of Biopolymers as a New Age Sustainable Material for Surfactant Adsorption: A Brief Review, *Carbohydr. Polym.*, **2**, 100145, 2021.
- Nagtode V.S., Cardoza C., Yasin H.K.A., Mali S.N., Tambe S.M., Roy P. et al., Green Surfactants (Biosurfactants): A Petroleum-Free Substitute for Sustainability— Comparison, Applications, Market, and Future Prospects, *ACS Omega*, **8**, 11674-11699, 2023.
- Baranwal J., Barse B., Fais A., Delogu G.L., and Kumar A., Biopolymer: A Sustainable Material for Food and Medical Applications, *Polymers*, **14**, 983, 2022.
- Aaliya B., Sunooj K.V., and Lackner M., Biopolymer Composites: A Review, *Int. J. Plast. Technol.*, **3**, 40-84, 2021.
- Bacelo H.A., Santos S.C., and Botelho C.M., Tannin-Based Biosorbents for Environmental Applications—A Review, *Chem. Eng. J.*, **303**, 575-587, 2016.
- Özacar M. and Şengil İ.A., Evaluation of Tannin Biopolymer as a Coagulant Aid for Coagulation of Colloidal Particles, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, **229**, 85-96, 2003.
- Chang M.-Y. and Juang R.-S., Equilibrium and Kinetic Studies on the Adsorption of Surfactant, Organic Acids and Dyes from Water onto Natural Biopolymers, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, **269**, 35-46, 2005.
- Kahya N., Kaygusuz H., and Erim F.B., Aqueous Removal of Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate (SDBS) by Crosslinked Chitosan Films, *J. Environ. Polym. Degrad.*, **26**, 2166-2172, 2018.
- Das D. and Pal A., Adsolubilization Phenomenon Perceived in Chitosan Beads Leading to a Fast and Enhanced Malachite Green Removal, *Chem. Eng. J.*, **290**, 371-380, 2016.
- Obeid L., El Kolli N., Dali N., Talbot D., Abramson S., Welschbillig M., Cabuil V., and Bée A., Adsorption of a Cationic Surfactant by a Magsorbent Based on Magnetic Alginate Beads, *J. Colloid Interf. Sci.*, **432**, 182-189, 2014.
- Alila S., Boufi S., Belgacem M.N., and Beneventi D., Adsorption of a Cationic Surfactant onto Cellulosic Fibers. I. Surface Charge Effects, *Langmuir*, **21**, 8106-8113, 2005.
- Tom L.H., Koopal L.K., de Keizer A., and Lyklema J., Adsorption of Nonionic Surfactants on Cellulose Surfaces: Adsorbed Amounts and Kinetics, *Langmuir*, **21**, 7768-7775, 2005.
- Beltrán-Heredia J., Sánchez-Martín J., and Solera-Hernández C., Removal of Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate from Water by Means of a New Tannin-Based Coagulant: Optimisation Studies through Design of Experiments, *Chem. Eng. J.*, **153**, 56-61, 2009.
- Bezerra K.G., Silva I.G., Almeida F.C., Rufino R.D., and Sarubbo L.A., Plant-Derived Biosurfactants: Extraction, Characteristics and Properties for Application in Cosmetics, *ISBAB*, **34**, 102036, 2021.
- Fenibo E.O., Ijoma G.N., Selvarajan R., and Chikere C.B., Microbial Surfactants: The Next Generation Multifunctional Biomolecules for Applications in the Petroleum Industry and Its Associated Environmental Remediation, *Microorganisms*, **7**, 581, 2019.
- Rawat G., Dhasmana A., and Kumar V., Biosurfactants: The Next Generation Biomolecules for Diverse Applications, *J. Environ. Sustain.*, **3**, 353-369, 2020.
- Vijayakumar S. and Saravanan V., Biosurfactants-Types, Sources and Applications, *Res. J. Microbiol.*, **10**, 181-192, 2015.
- Sharma J., Sundar D., and Srivastava P., Biosurfactants: Potential Agents for Controlling Cellular Communication, Motility, and Antagonism, *Front. Mol. Biosci.*, **8**, 727070, 2021.
- Ribeiro B.G., Guerra J.M., and Sarubbo L.A., Biosurfactants: Production and Application Prospects in the Food Industry, *Biotechnol. Prog.*, **36**, e3030, 2020.
- Rocha e Silva F.C.P., Rocha e Silva N.M.P., Luna J.M., Rufino R.D., Santos V.A., and Sarubbo L.A., Dissolved Air Flotation Combined to Biosurfactants: A Clean and Efficient Alternative to Treat Industrial Oily Water, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, **17**, 591-602, 2018.
- Shakeri F., Babavalian H., Amoozegar M.A., Ahmadzadeh Z., Zuhuriyanizadi S., and Afsharian M.P., Production and Application of Biosurfactants in Biotechnology, *Biointerface Res. Appl. Chem.*, **11**, 10446-10460, 2021.
- Vecino X., Cruz J., Moldes A., and Rodrigues L., Biosurfactants in Cosmetic Formulations: Trends and Challenges, *Crit. Rev. Biotechnol.*, **37**, 911-923, 2017.
- Hegazy M., Hegazy M., Awad M., and Shawky M., Chemical, Electrochemical, Theoretical (DFT & MEP), Thermodynamics and Surface Morphology Studies of Carbon Steel during Gas and Oil Production Using Three Novel Di-cationic

- Amphiphiles as Corrosion Inhibitors in Acidic Medium, *J. Mol. Liq.*, **337**, 116541, 2021.
28. Fawzy A., Al Bahir A., Alqarni N., Toghan A., Khider M., Ibrahim I.M. et al., Evaluation of Synthesized Biosurfactants as Promising Corrosion Inhibitors and Alternative Antibacterial and Antidermatophytes Agents, *Sci. Rep.*, **13**, 2585, 2023.
 29. Zehra S., Mobin M., and Aslam R., *Application of Biosurfactants as Anti-Corrosive Agents, in Advancements in Biosurfactants Research*, Springer, 171-189, 2023.
 30. Sharma N., Lavania M., and Lal B., Biosurfactant: An Emerging Tool for the Petroleum Industries, *Front. Microbiol.*, **14**, 1254557, 2023.
 31. Shah M.U.H., Reddy A.V.B., Yusup S., Goto M., and Moniruzzaman M., Ionic liquid-Biosurfactant Blends as Effective Dispersants for Oil Spills: Effect of Carbon Chain Length and Degree of Saturation, *Environ. Pollut.*, **284**, 117119, 2021.
 32. Jiménez-Peñalver P., Castillejos M., Koh A., Gross R., Sánchez A., Font X., and Gea T., Production and Characterization of Sophorolipids from Stearic Acid by Solid-State Fermentation, A Cleaner Alternative to Chemical Surfactants, *J. Clean. Prod.*, **172**, 2735-2747, 2018.
 33. Mohebrad B., Rezaee A., Dehghani S., Zamanian M., and Hamedrahmat M., Feasibility of Rhamnolipid Biosurfactant Production from Oily Wastewaters by *Pseudomonas aeruginosa* Isolated from Hospital Wastewater, *JRUMS*, **17**, 143-156, 2018.
 34. Paulino B.N., Pessôa M.G., Mano M.C.R., Molina G., Neri-Numa I.A., and Pastore G.M., Current Status in Biotechnological Production and Applications of Glycolipid Biosurfactants, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **100**, 10265-10293, 2016.
 35. Thakur P., Saini N.K., Thakur V.K., Gupta V.K., Saini R.V., and Saini A.K., Rhamnolipid the Glycolipid Biosurfactant: Emerging Trends and Promising Strategies in the Field of Biotechnology and Biomedicine, *Microb. Cell Fact.*, **20**, 1-15, 2021.
 36. De Oliveira M.R., Camilios-Neto D., Baldo C., Magri A., and Celligoi M., Biosynthesis and Production of Sophorolipids, *Int. J. Sci. Technol. Res.*, **3**, 133-146, 2014.
 37. Abhyankar I., Hirlekar S., Prabhune A., and Nisal A., Bridging the Gap: An Investigation of Biosurfactants-Polymer Systems, *COCIS*, 101806, 2024.
 38. Hirlekar S., Ray D., Aswal V.K., Prabhune A.A., and Nisal A., Lauric Acid Sophorolipid: Accelerating the Gelation of Silk Fibroin, *ACS Omega*, **5**, 28571-28578, 2020.
 39. Liu Y., Shen J., Shi J., Gu X., Chen H., Wang X., Wang L. et al., Functional Polymeric Core-Shell Hybrid Nanoparticles Overcome Intestinal Barriers and Inhibit Breast Cancer Metastasis, *Chem. Eng. J.*, **427**, 131742, 2022.
 40. Czaplicka N., Konopacka-Lyskawa D., Nowotnik A., Mielewczyk-Gryń A., Łapiński M., and Bray R., Precipitation of Calcium Carbonate in the Presence of Rhamnolipids in Alginate Hydrogels as a Model of Biomineralization, *Colloids Surf. B: Biointerf.*, **218**, 112749, 2022.
 41. Arif M., Sharaf M., Samreen, Khan S., Chi Z., and Liu C.-G., Chitosan-Based Nanoparticles as Delivery-Carrier for Promising Antimicrobial Glycolipid Biosurfactant to Improve the Eradication Rate of *Helicobacter Pylori* Biofilm, *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.*, **32**, 813-832, 2021.
 42. Farias J.M., Stamford T.C.M., Resende A.H.M., Aguiar J.S., Rufino R.D., Luna J.M., and Sarubbo L.A., Mouthwash Containing a Biosurfactant and Chitosan: An Eco-Sustainable Option for the Control of Cariogenic Microorganisms, *Int. J. Biol. Macromol.*, **129**, 853-860, 2019.
 43. Yorke K. and Amin S., High Performance Conditioning Shampoo with Hyaluronic Acid and Sustainable Surfactants, *Cosmetics*, **8**, 71, 2021.
 44. Meena K.R. and Kanwar S.S., Lipopeptides as the Antifungal and Antibacterial Agents: Applications in Food Safety and Therapeutics, *Biomed Res. Int.*, **2015**, 2015.
 45. Davydova V., Bratskaya S.Y., Gorbach V., Solov'eva T., Kaca W., and Yermak I., Comparative Study of Electrokinetic Potentials and Binding Affinity of lipopolysaccharides-Chitosan Complexes, *Biophys. Chem.*, **136**, 1-6, 2008.
 46. Jayakumar A., Radoor S., Nair I.C., Siengchin S., Parameswaranpillai J., and Radhakrishnan E., Lipopeptide and Zinc Oxide Nanoparticles Blended Polyvinyl Alcohol-Based Nanocomposite Films as Antimicrobial Coating for Biomedical Applications, *Proc. Biochem.*, **102**, 220-228, 2021.
 47. Fasihi-Ramandi M., Ghobadi-Ghadikolaee H., Ahmadi-Renani S., Taheri R.A., and Ahmadi K., Vibrio Cholerae Lipopolysaccharide Loaded Chitosan Nanoparticle could Save Life by Induction of Specific Immunoglobulin Isotype, *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, **46**, 56-61, 2018.
 48. Xu L., Zhang B., Qin Y., Li F., Yang S., Lu P. et al., Preparation and Characterization of Antifungal Coating Films Composed of Sodium Alginate and Cyclolipopeptides Produced by *Bacillus Subtilis*, *Int. J. Biol. Macromol.*, **143**, 602-609, 2020.
 49. Zhen C., Ge X.F., Lu Y.T., and Liu W.Z., Chemical Structure, Properties and Potential Applications of Surfactin, as well as Advanced Strategies for Improving its Microbial Production, *AIMS Microbiol.*, **9**, 195, 2023.
 50. Yuan B., Xu P.Y., Zhang Y.-J., Wang P.-P., Yu H., and Jiang J.-H., Synthesis of Biocontrol Macromolecules by Derivative of Chitosan with Surfactin and Antifungal Evaluation, *Int. J. Biol. Macromol.*, **66**, 7-14, 2014.

51. Ahire J., Robertson D., Van Reenen A., and Dicks L., Surfactin-Loaded Polyvinyl Alcohol (PVA) Nanofibers Alters Adhesion of *Listeria Monocytogenes* to Polystyrene, *Mater. Sci. Eng. C.*, **77**, 27-33, 2017.
52. Kundu D., Hazra C., Chatterjee A., Chaudhari A., and Mishra S., Biopolymer and Biosurfactant-Graft-Calcium Sulfate/Polystyrene Nanocomposites: Thermophysical, Mechanical and Biodegradation Studies, *Polym. Degrad. Stab.*, **107**, 37-52, 2014.