19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

نقش بیوسورفکتانت‌ها در افزایش جذب عناصر ریزمغذی توسط گیاه

علی عبادی[1*]، مهدی نورزاده حداد[1]، هادی رضائی راد[1]

۱- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای ؛ * aebadi@aeoi.org.ir

چکیده

بیوسورفکتانت‌ها، ترکیبات سطح‌فعال زیستی تولیدشده توسط میکروارگانیسم‌ها، به‌دلیل توانایی در بهبود زیست‌فراهمی عناصر غذایی و کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی، به‌عنوان جایگزین‌هایی پایدار در کشاورزی نوین مطرح شده‌اند. این ترکیبات با ساختار آمفی‌فیلیک خود، از طریق مکانیسم‌هایی مانند کاهش کشش سطحی، کلاته‌سازی فلزات، و تحریک میکروبیوم خاک، موجب افزایش جذب عناصر ریزمغذی از جمله آهن، روی، مس و منگنز توسط گیاهان می‌شوند. در این مقاله، با مروری بر انواع بیوسورفکتانت‌ها (گلیکولیپیدها، لیپوپپتیدها و غیره)، ساختار شیمیایی، عملکرد زیستی و نقش آن‌ها در تغذیه گیاهی بررسی شده است. همچنین، چالش‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مرتبط با تولید و کاربرد این ترکیبات، از جمله هزینه بالای تولید صنعتی، پایداری محدود در خاک، و نبود استانداردهای جهانی مورد بحث قرار گرفته‌اند. با توجه به پیشرفت‌های نوین در زیست‌فناوری، نانوفناوری و مهندسی سویه‌های میکروبی، چشم‌انداز توسعه بیوسورفکتانت‌ها در قالب کودهای زیستی نسل جدید، سامانه‌های رهاسازی هدفمند، و کشاورزی هوشمند بسیار امیدبخش است. یافته‌ها نشان می‌دهند که بیوسورفکتانت‌ها می‌توانند نقشی کلیدی در ارتقای پایداری، بهره‌وری و سلامت خاک در سامانه‌های زراعی آینده ایفا کنند.

واژگان کلیدی: ترکیبات سطح فعال، تغذیه گیاه، زیست‌فراهمی، کشش سطحی،کلاته‌سازی

مقدمه

در سال‌های اخیر، بحران‌های جهانی مرتبط با کاهش کیفیت خاک، تغییرات اقلیمی، افزایش تقاضا برای تولید مواد غذایی و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، موجب تمرکز گسترده بر استفاده از جایگزین‌های زیستی در کشاورزی شده است (Sharma et al., 2022). در این میان، بیوسورفکتانت‌ها به‌عنوان ترکیبات سطح‌فعال تولیدشده توسط میکروارگانیسم‌ها، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند؛ زیرا می‌توانند بدون ایجاد آلودگی زیست‌محیطی، در بهبود زیست‌فراهمی عناصر غذایی در خاک مؤثر واقع شوند (Banat et al., 2014; Gutiérrez-Chávez et al., 2021). بیوسورفکتانت‌ها ترکیباتی آمفی‌فیلیک هستند که دارای دو بخش آب‌دوست و آب‌گریز می‌باشند، و این ویژگی آن‌ها را قادر می‌سازد تا کشش سطحی آب را کاهش داده، نفوذپذیری خاک را افزایش داده و جذب عناصر غذایی را بهینه کنند (Pacwa-Płociniczak et al., 2011). یکی از مزایای اصلی آن‌ها، توانایی در کلاته‌سازی فلزات سنگین و عناصر ریزمغذی مانند آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu) و منگنز (Mn) است؛ عناصری که معمولاً در خاک‌های قلیایی یا فقیر، در فرم غیرقابل‌جذب برای گیاهان وجود دارند (Huang et al., 2019). علاوه بر این، برخی بیوسورفکتانت‌ها با تحریک رشد میکروارگانیسم‌های مفید در ریزوسفر، به‌صورت غیرمستقیم نیز موجب بهبود دسترسی گیاه به عناصر غذایی می‌شوند (Sachdev and Cameotra, 2013). استفاده از این ترکیبات نه‌تنها با اهداف زیست‌محیطی و پایداری اکوسیستم خاک سازگار است، بلکه در راستای توسعه کشاورزی هوشمند و کم‌نهاده نیز قرار دارد (Sachdev and Cameotra, 2013; Sobrinho et al., 2023). بنابراین، در این مقاله تلاش می‌شود تا با مروری جامع بر ساختار، مکانیسم‌های اثر، مزایا، چالش‌ها و آینده‌پژوهی مرتبط با بیوسورفکتانت‌ها، نقش کلیدی آن‌ها در افزایش جذب عناصر ریزمغذی توسط گیاه بررسی گردد.

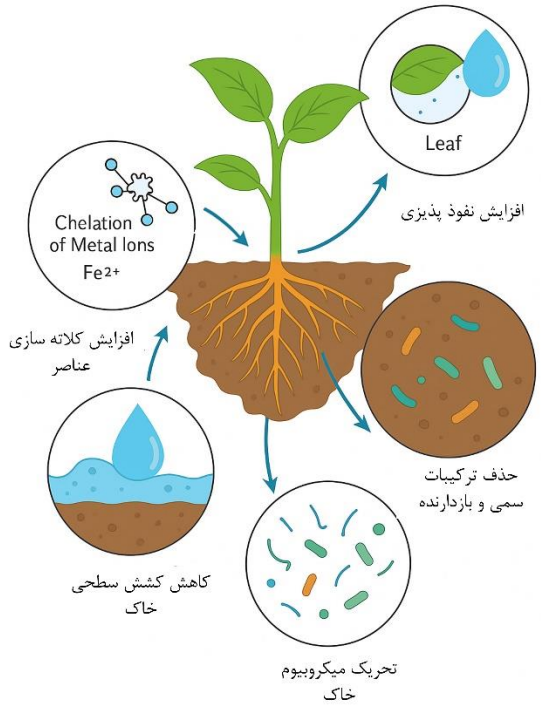
انواع بیوسورفکتانت‌ها و ویژگی‌های کلیدی

بیوسورفکتانت‌ها ترکیباتی آمفی‌فیلیک هستند که از سویه‌های میکروبی مختلف، از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها، تولید می‌شوند. این ترکیبات به‌صورت طبیعی به‌منظور کاهش کشش سطحی، افزایش تحرک در محیط، و تعامل با سطوح تولید می‌گردند و بسته به ساختار شیمیایی خود، در چند گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند (Ebadi et al., 2018; Nitschke & Silva, 2018). گلیکولیپیدها رایج‌ترین و پرکاربردترین بیوسورفکتانت‌ها در بخش کشاورزی هستند. این گروه شامل رامنولیپیدها تولیدشده توسط *Pseudomonas aeruginosa* و سوفورولیپیدها تولیدشده توسط *Candida bombicola* است. رامنولیپیدها توانایی بالایی در کلاته‌سازی یون‌های فلزی دارند و می‌توانند فراهمی عناصر غذایی مانند آهن، روی و مس را افزایش دهند (Chen et al., 2020). همچنین، این ترکیبات در پایداری زیستی، سمیت پایین، و عملکرد مؤثر در دامنه وسیعی از pH و دما نسبت به انواع شیمیایی آن برتری دارند (Gutiérrez-Chávez et al., 2021). لیپوپپتیدها مانند سورفاکتین، ایتورین و فنگیسین، معمولاً توسط گونه‌های *Bacillus subtilis* تولید می‌شوند. این ترکیبات علاوه بر اثرات سطح‌فعال، دارای ویژگی‌های ضدباکتریایی، ضدقارچی و القاکننده مقاومت سیستمیک در گیاهان هستند (Ongena & Jacques, 2008). سورفاکتین می‌تواند زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی را از طریق افزایش تحرک در ریزوسفر افزایش دهد و نقش دوگانه‌ای در تغذیه و محافظت گیاه ایفا کند. این بیوسورفکتانت‌ها، که اغلب توسط مخمرها و باکتری‌های خاکزی تولید می‌شوند، دارای خواص امولسیون‌کنندگی قوی بوده و در تنظیم انتقال عناصر غذایی نقش دارند. گرچه کاربرد کشاورزی آن‌ها به اندازه گلیکولیپیدها رایج نیست، اما در ترکیب با سایر مواد زیستی یا به‌عنوان ناقل برای نانوذرات دارای پتانسیل بالایی هستند (Rodrigues et al., 2006). پلی‌ساکاریدهای سطحی شامل ترکیباتی مانند امولسان تولیدشده توسط *Acinetobacter calcoaceticus* است. اگرچه فعالیت کاهش‌دهنده کشش سطحی آن‌ها کمتر از گلیکولیپیدهاست، اما به دلیل خاصیت چسبندگی و توانایی در ساختاردهی به خاک، می‌توانند در تثبیت عناصر غذایی و کاهش آبشویی آن‌ها مؤثر باشند (Mulligan, 2005). در مجموع، ساختار شیمیایی بیوسورفکتانت‌ها نقش مهمی در تعیین عملکرد آن‌ها در خاک دارد. ویژگی‌هایی چون پایداری محیطی، زیست‌تخریب‌پذیری، توانایی در کلاته‌سازی فلزات، و اثرات هم‌افزایی با ریزجانداران خاک، آن‌ها را به گزینه‌هایی ایده‌آل برای کشاورزی پایدار تبدیل کرده است (Sobrinho et al., 2023).

مکانیسم‌های اثر بیوسورفکتانت‌ها بر جذب عناصر غذایی

بیوسورفکتانت‌ها با بهره‌گیری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی منحصر به‌فرد، از طریق مکانیسم‌های گوناگون قادرند زیست‌فراهمی و جذب عناصر غذایی، به‌ویژه عناصر ریزمغذی، را در خاک بهبود بخشند. این مکانیسم‌ها اغلب به‌صورت هم‌افزا عمل می‌کنند که بطور خلاصه در شکل ۱ نمایش داده شده است. کاهش کشش سطحی و بهبود انتقال مواد در خاک: یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های بیوسورفکتانت‌ها، کاهش کشش سطحی آب و افزایش ترشوندگی خاک است. این پدیده موجب بهبود توزیع رطوبت و حرکت یکنواخت‌تر محلول‌های غذایی در خاک می‌شود و به‌ویژه در خاک‌های با بافت سنگین یا کم‌نفوذ، دسترسی گیاه به منابع غذایی را افزایش می‌دهد (Singh and Cameotra, 2004). به‌علاوه، بیوسورفکتانت‌ها می‌توانند مهاجرت یون‌ها و ترکیبات آلی محلول را در خاک تسهیل کرده و آن‌ها را به ناحیه ریزوسفر برسانند. کلاته‌سازی فلزات و تبدیل عناصر نامحلول به فرم قابل جذب: بیوسورفکتانت‌ها اغلب دارای گروه‌های عاملی فعال مانند کربوکسیل، فسفات و هیدروکسیل هستند که توانایی بالایی در تشکیل کمپلکس با یون‌های فلزی دارند. این ویژگی به آن‌ها اجازه می‌دهد تا فلزاتی مانند Fe^{3+} ، Zn^{2+}، Cu^{2+}و Mn^{2+} را از فرم‌های نامحلول، اکسید شده یا تثبیت‌شده، به فرم‌های محلول و قابل جذب توسط گیاه تبدیل کنند (Huang et al., 2019; Chen et al., 2020). در خاک‌های قلیایی که قابلیت جذب این عناصر به‌شدت کاهش می‌یابد، این

مکانیسم نقش حیاتی دارد. افزایش زیست‌دسترسی از طریق تحریک میکروبیوم خاک: برخی بیوسورفکتانت‌ها می‌توانند به‌عنوان منابع کربنی یا سیگنال‌های شیمیایی، جمعیت میکروبی مفید در ناحیه ریزوسفر را تحریک کنند. این میکروارگانیسم‌ها، از جمله باکتری‌های حل‌کننده فسفات و قارچ‌های میکوریز، در بهبود چرخه عناصر غذایی و افزایش زیست‌فراهمی آن‌ها نقش مؤثری دارند (Sachdev et al., 2011). همچنین، تعامل بیوسورفکتانت‌ها با آنزیم‌های خاک و تولید اسیدهای آلی ثانویه می‌تواند آزادسازی عناصر تثبیت‌شده را تسهیل کند. پاکسازی ریشه از ترکیبات مضر: بیوسورفکتانت‌ها در برخی موارد می‌توانند ترکیبات سمی و بازدارنده جذب مانند فلزات سنگین یا آلاینده‌های آلی را از ناحیه ریشه حذف کنند. این ویژگی نه تنها جذب عناصر ضروری را بهبود می‌دهد بلکه از تنش‌های اکسیداتیو نیز جلوگیری می‌کند (Mulligan, 2005; Sharma et al., 2022). افزایش نفوذپذیری ریشه و برگ: بیوسورفکتانت‌ها از طریق تعامل با غشای سلولی ریشه‌ها، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ناحیه ریزوسفر و سطح ریشه را تغییر می‌دهند. بیوسورفکتانت‌ها با کاهش کشش سطحی محلول خاک باعث می‌شود آب و یون‌ها راحت‌تر به سطح ریشه نفوذ کنند. برخی بیوسورفکتانت‌ها با برهم‌کنش با فسفولیپیدهای غشایی و افزایش تراوایی غشا جریان یون‌های فلزی را افزایش می‌دهند. گزارش شده است بیوسورفکتانت‌ها با تحریک رشد ریشه‌های مویین سطح تماس فعال جذب عناصر را افزایش می‌دهد. به عنوان مثال سورفاکتین تولیدی *Bacillus subtilis* موجب افزایش رشد ریشه‌چه و شاخه‌چه در گیاه ذرت شد که با افزایش جذب فسفر و آهن همراه بود (Kumar et al., 2022). همچنین ممکن است بیوسورفکتانت‌ها به‌طور غیرمستقیم بیان ناقل‌های جذب یون‌های فلزی Fe^{2+}، Zn^{2+} و Cu^{2+} را در ریشه‌ها افزایش دهند. در محلول‌پاشی‌های برگی، یکی از موانع اصلی جذب عناصر غذایی، وجود لایه واکسی کوتیکول برگ است. بیوسورفکتانت‌ها با تغییر رفتار قطره روی برگ، نفوذ مواد را بهبود می‌بخشند. این مکانیسم شامل کاهش کشش سطحی قطره است که پخش یکنواخت‌تر و چسبندگی بهتر محلول غذایی روی سطح برگ را به دنبال دارد. همچنین بیوسورفکتانت‌ها منافذ موقتی در لایه مومی ایجاد می‌کنند که نفوذ آسان‌تر از لایه کوتیکولی را سبب می‌شود. به علاوه بیوسورفکتانت‌ها با افزایش نرخ انتقال درونی ورود یون‌ها به پارانشیم برگ را تسریع می‌کند. به‌طور خلاصه، ترکیب عملکرد فیزیکی (مانند بهبود حرکت محلول خاک)، عملکرد شیمیایی (کلاته‌سازی و کمپلکس‌سازی فلزات)، تعامل زیستی با میکروارگانیسم‌ها، و افزایش نفوذپذیری ریشه و برگ موجب می‌شود بیوسورفکتانت‌ها به‌عنوان ابزار چندوجهی در افزایش جذب عناصر ریزمغذی توسط گیاهان عمل کنند.



شکل ۱- مکانیسم‌های تاثیر بیوسورفکتانت بر افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاهان

نقش بیوسورفکتانت‌ها در فراهم‌سازی عناصر ریزمغذی

عناصر ریزمغذی یا ریزمغذی‌ها (Micronutrients) مانند آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu) و منگنز (Mn)، علی‌رغم نیاز اندک گیاهان به آن‌ها، نقشی اساسی در فرآیندهای فیزیولوژیک از جمله فتوسنتز، تنفس سلولی، سنتز آنزیم‌ها و تنظیم رشد ایفا می‌کنند (Alloway, 2008). با این حال، قابلیت جذب این عناصر در بسیاری از خاک‌ها، به‌ویژه در شرایط pH قلیایی، شوری، یا کمبود ماده آلی، به شدت محدود است. در چنین شرایطی، استفاده از بیوسورفکتانت‌ها به‌عنوان ابزاری برای افزایش فراهمی این عناصر، مورد توجه جدی قرار گرفته است. آهن نقش کلیدی در ساختار کلروفیل و عملکرد آنزیم‌های تنفسی دارد. در بسیاری از خاک‌های آهکی یا قلیایی، آهن به‌صورت Fe^{3+} و به شکل اکسیدهای نامحلول حضور دارد که توسط ریشه گیاه قابل جذب نیست. بیوسورفکتانت‌هایی مانند رامنولیپیدها و سورفاکتین، از طریق کلاته‌سازی Fe^{3+} و تشکیل کمپلکس‌های محلول، دسترسی گیاه به این عنصر حیاتی را افزایش می‌دهند (Mulligan, 2005; Gutiérrez-Chávez et al., 2021). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از سویه‌های تولیدکننده بیوسورفکتانت در خاک‌های فقیر از نظر آهن، می‌تواند محتوای آهن برگ‌ها و میزان کلروفیل را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (Chen et al., 2020). روی در سنتز پروتئین‌ها، رشد سلولی و تنظیم هورمون‌های گیاهی نقش دارد. این عنصر در خاک‌های قلیایی، به‌شدت غیرقابل‌دسترس می‌شود. بیوسورفکتانت‌ها با حل‌سازی Zn^{2+} از کمپلکس‌های معدنی، زیست‌فراهمی آن را افزایش داده و جذب ریشه‌ای را تسهیل می‌کنند. همچنین، برخی باکتری‌های ریزوسفری قادرند بیوسورفکتانت‌هایی تولید کنند که همزمان باعث افزایش جذب روی و رشد گیاهان می‌شوند (Rashedi et al., 2021). مس در واکنش‌های اکسیداسیون-کاهش و ساخت آنزیم‌های اکسیداز نقش دارد، در حالی که منگنز برای عملکرد آنزیم‌های کربوکسیلاز و در فرآیندهای فتوسنتزی حیاتی است. در خاک‌هایی با ظرفیت تبادل کاتیونی بالا یا

میزان بالای کربنات‌ها، دسترسی این عناصر کاهش می‌یابد. بیوسورفکتانت‌ها با تشکیل کمپلکس‌های پایدار از Cu^{2+} و Mn^{2+}، این عناصر را از فرم‌های تثبیت‌شده آزاد کرده و امکان جذب آن‌ها را افزایش می‌دهند (Huang et al., 2019; Sharma et al., 2022). مطالعات میدانی و گلخانه‌ای متعددی نشان داده‌اند که تلقیح خاک یا بذر با سویه‌های میکروبی تولیدکننده بیوسورفکتانت می‌تواند منجر به افزایش محتوای عناصر ریزمغذی در اندام‌های هوایی و ریشه‌ای گیاهان شود. برای مثال، در یک مطالعه انجام‌شده روی ذرت، استفاده از باکتری‌های تولیدکننده رامنولیپید منجر به افزایش ۳۵٪ در جذب آهن و ۲۸٪ در جذب روی گردید (Sobrinho et al., 2023). بنابراین، بیوسورفکتانت‌ها با فراهم‌سازی فرم‌های قابل جذب عناصر کلیدی، نه‌تنها کمبودهای تغذیه‌ای را کاهش می‌دهند، بلکه می‌توانند نیاز به مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی را نیز تعدیل کنند. این ویژگی، آن‌ها را به ابزارهایی مؤثر در مدیریت تغذیه پایدار گیاه در کشاورزی مدرن تبدیل کرده است. جدول ۱ و ۲ تاثیر کاربرد بیوسورفکتانت‌ها و مقایسه انواع آن‌ها در جذب عناصر ریزمغذی در مطالعات پیشین را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تأثیر بیوسورفکتانت‌ها بر جذب عناصر ریزمغذی

عنصر	درصد افزایش جذب (تقریبی)	منبع
آهن (Fe)	تا ۶۵	Sharma et al. (2023)
روی (Zn)	۵۵–۶۰	Banat et al. (2021)
مس (Cu)	۳۵–۴۵	Li et al. (2020)
منگنز (Mn)	۳۰–۵۰	Marchut-Mikołajczyk et al. (2023)

جدول ۲- مقایسه انواع بیوسورفکتانت‌ها در جذب عناصر ریزمغذی

بیوسورفکتانت	درصد افزایش جذب				منبع
	آهن	روی	مس	منگنز	
رامنولیپید	۱۶۵	۱۵۵	۱۴۰	۱۵۰	Sharma et al. (2023); Banat et al. (2021)
سورفاکتین	۱۵۰	۱۴۵	۱۳۰	۱۳۵	Mnif et al. (2022); Li et al. (2020)
سوفورولیپید	۱۳۵	۱۳۰	۱۲۰	۱۲۵	Kiran et al. (2020); Marchut-Mikołajczyk et al. (2023)

چالش‌ها و محدودیت‌ها در کاربرد بیوسورفکتانت‌ها

با وجود پتانسیل بالای بیوسورفکتانت‌ها در بهبود تغذیه گیاهی و کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی، به‌کارگیری عملی آن‌ها در کشاورزی هنوز با چالش‌ها و موانع متعددی مواجه است. این چالش‌ها را می‌توان در سه حوزه اصلی بررسی کرد؛ یکی از اساسی‌ترین موانع، هزینه بالای تولید بیوسورفکتانت‌ها در مقیاس صنعتی است. تولید این ترکیبات نیازمند محیط‌های کشت ویژه، تنظیم دقیق شرایط تخمیر (pH، دما، اکسیژن) و زمان فرآیند نسبتاً طولانی است (Rodrigues et al., 2006). از سوی دیگر، بهره‌وری تولید بسته به نوع میکروارگانیسم، منبع کربن و شرایط محیطی متغیر است. برای مثال، تولید رامنولیپیدها توسط *Pseudomonas aeruginosa* نیازمند کنترل زیستی دقیق است، چرا که این باکتری به‌عنوان پاتوژن فرصت‌طلب شناخته می‌شود و استفاده از آن در برخی کشورها با محدودیت قانونی همراه است (Banat et al., 2014). بیوسورفکتانت‌ها گرچه زیست‌تخریب‌پذیر هستند، اما پایداری عملکرد آن‌ها در شرایط واقعی مزرعه هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است. در

خاک‌هایی با فعالیت میکروبی بالا یا ساختار فیزیکی متراکم، تجزیه سریع این ترکیبات ممکن است اثربخشی آن‌ها را کاهش دهد (Marchant & Banat, 2012). همچنین، برهم‌کنش آن‌ها با سایر ترکیبات خاک مانند مواد آلی، نمک‌ها و کودها می‌تواند باعث تغییر در عملکرد سطح‌فعال یا کلاته‌سازی شود. در برخی موارد، استفاده ترکیبی با کودهای شیمیایی یا آلی منجر به اثرات پیش‌بینی‌نشده‌ای مانند سمیت نسبی برای گیاه یا کاهش جذب عناصر خاص شده است (Sobrinho et al., 2023). در حال حاضر، قیمت تمام‌شده بیوسورفکتانت‌ها نسبت به کودهای رایج بالاست، که موجب کاهش جذابیت اقتصادی برای کشاورزان می‌شود، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه. همچنین، نبود استانداردهای بین‌المللی مشخص برای دسته‌بندی، برچسب‌گذاری و ارزیابی اثربخشی بیوسورفکتانت‌های کشاورزی، موجب کاهش اعتماد بازار و موانع تجاری شده است (Singh et al., 2019). محدودیت‌های مربوط به ثبت، مجوز زیستی، و نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با سویه‌های تولیدکننده نیز از دیگر موانع کاربرد گسترده این فناوری هستند. اگرچه بیوسورفکتانت‌ها به‌عنوان ابزارهایی امیدوارکننده برای بهبود جذب عناصر غذایی مطرح هستند، اما غلبه بر چالش‌های یادشده نیازمند پیشرفت‌های فناورانه، کاهش هزینه تولید، تدوین استانداردهای جهانی، و تحقیقات میدانی گسترده‌تر است. راهکارهایی مانند استفاده از پسماندهای کشاورزی برای تغذیه میکروبی، به‌کارگیری سویه‌های GRAS (Generally Recognized As Safe) و توسعه نانوفناوری در طراحی حامل‌های بیوسورفکتانت، در کاهش این موانع مؤثر خواهند بود.

آینده‌پژوهی و چشم‌اندازهای کاربردی

بیوسورفکتانت‌ها در آستانه تبدیل شدن به بخشی از راهکارهای نوین برای کشاورزی پایدار قرار دارند. پیشرفت‌های اخیر در زیست‌فناوری، مهندسی میکروبی، نانوتکنولوژی و طراحی کودهای هوشمند، افق‌های تازه‌ای را برای کاربرد گسترده و مؤثر آن‌ها در تغذیه گیاهی گشوده است. یکی از محورهای مهم آینده‌پژوهی، استفاده از مهندسی ژنتیک و سنتز مصنوعی برای ایجاد سویه‌های میکروبی اصلاح‌شده با توانایی بالا در تولید بیوسورفکتانت‌های خاص، هدفمند و مقرون‌به‌صرفه است. برای مثال، ایجاد سویه‌های مهندسی‌شده *Bacillus subtilis* یا *Pseudomonas putida* که تولید رامنولیپید یا سورفاکتین را با راندمان بالا انجام می‌دهند، می‌تواند تولید صنعتی را به شدت بهینه کند (Nitschke & Costa, 2007; Sharma et al., 2022). ترکیب بیوسورفکتانت‌ها با نانوذرات زیست‌سازگار (نانوکلی، نانوکیتوسان و نانولیپوزوم‌ها) می‌تواند منجر به طراحی سیستم‌های رهاسازی هوشمند و تدریجی شود که اثربخشی ترکیبات زیستی را افزایش می‌دهند. این فناوری نه تنها دز مصرفی را کاهش می‌دهد، بلکه دوام ماده فعال را در محیط خاک بهبود می‌بخشد و جذب گیاه را هدفمند می‌کند (Sobrinho et al., 2023). جهت‌گیری جدیدی در طراحی بیوسورفکتانت‌ها در حال شکل‌گیری است که ترکیباتی با چند عملکرد همزمان تولید شوند. به‌عنوان مثال، ترکیباتی که همزمان کلاته‌سازی عناصر غذایی، مهار پاتوژن‌های خاک‌زاد، و القای مقاومت گیاهی را انجام دهند (Ongena & Jacques, 2008). این بیوسورفکتانت‌های چندمنظوره می‌توانند جایگزین بخشی از کودها و سموم شیمیایی شوند و نیاز به کاربرد چندگانه نهاده‌ها را کاهش دهند. برای توسعه کاربردی بیوسورفکتانت‌ها، تدوین چارچوب‌های مقرراتی و استانداردهای بین‌المللی ضروری است. ایجاد دستورالعمل‌های ایمنی زیستی برای سویه‌های تولیدکننده، تعیین استانداردهای کیفیت و خلوص، و تدوین شاخص‌های اثربخشی در شرایط خاک‌های مختلف، نقش کلیدی در تجاری‌سازی این فناوری دارد (Singh et al., 2019). در آینده، پیش‌بینی می‌شود که بیوسورفکتانت‌ها به‌عنوان بخشی از سیستم‌های کشاورزی دیجیتال و هوشمند ایفای نقش کنند. استفاده از حسگرهای زیستی، سیستم‌های تصمیم‌یار و اینترنت اشیاء می‌تواند کاربرد هدفمند این ترکیبات را بر پایه شرایط واقعی خاک و نیاز گیاه بهینه کند. این رویکرد، هم‌راستا با اصول کشاورزی اقلیم‌پایدار و اقتصاد چرخشی خواهد بود (Sharma et al., 2022). آینده کاربرد بیوسورفکتانت‌ها، با اتکا بر فناوری‌های پیشرفته و رویکردهای چندرشته‌ای، بسیار روشن به نظر می‌رسد. این ترکیبات نه‌تنها پتانسیل جایگزینی بخشی از نهاده‌های شیمیایی را دارند، بلکه

می‌توانند در طراحی نسل جدید کودهای زیستی، سامانه‌های کشت کم‌نهاده و استراتژی‌های احیای خاک‌های تخریب‌شده، نقش محوری ایفا کنند.

نتیجه‌گیری

بیوسورفکتانت‌ها به‌عنوان ترکیبات زیستی سطح‌فعال، با قابلیت کلاته‌سازی، کاهش کشش سطحی، و تعامل با میکروبیوم خاک، نقش کلیدی در افزایش زیست‌فراهمی و جذب عناصر ریزمغذی توسط گیاهان ایفا می‌کنند. این ترکیبات از طریق مکانیسم‌های پیچیده‌ای مانند حل‌سازی عناصر تثبیت‌شده، تحریک رشد میکروارگانیسم‌های مفید و بهبود انتقال رطوبت و مواد غذایی در خاک، می‌توانند کمبودهای تغذیه‌ای را کاهش داده و کارایی سیستم‌های زراعی را بهبود بخشند. گروه‌های مختلف بیوسورفکتانت‌ها مانند گلیکولیپیدها و لیپوپپتیدها، هر یک ویژگی‌ها و مزایای منحصربه‌فردی دارند که آن‌ها را برای استفاده در شرایط مختلف خاک و اقلیم مناسب می‌سازد. با این حال، موانعی همچون هزینه بالای تولید، ناپایداری عملکرد در شرایط واقعی خاک، و نبود زیرساخت‌های مقرراتی و استانداردسازی جهانی، استفاده گسترده از این فناوری را محدود کرده‌اند. با وجود این چالش‌ها، پیشرفت‌های سریع در حوزه‌های زیست‌فناوری، مهندسی سویه‌های میکروبی، نانوفناوری و کشاورزی دیجیتال، مسیر توسعه و کاربرد مؤثر بیوسورفکتانت‌ها را هموار کرده است. آینده‌پژوهی این حوزه نشان می‌دهد که بیوسورفکتانت‌ها می‌توانند به‌عنوان اجزای کلیدی کودهای زیستی نسل جدید، و بخشی از سامانه‌های کشاورزی هوشمند، جایگاهی مهم در تغذیه پایدار گیاهان پیدا کنند. بنابراین، سرمایه‌گذاری در تحقیقات میان‌رشته‌ای، طراحی سیستم‌های رهاسازی هدفمند، و تدوین سیاست‌های حمایتی در سطح ملی و بین‌المللی، می‌تواند کاربرد عملی بیوسورفکتانت‌ها را از سطح آزمایشگاهی به مزرعه منتقل کند و نقش آن‌ها را در تأمین امنیت غذایی و سلامت خاک در قرن ۲۱ تقویت نماید.

منابع

Alloway, B. J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition. International Zinc Association.

Banat, I. M., Franzetti, A., Gandolfi, I., Bestetti, G., Martinotti, M. G., Fracchia, L., ... & Marchant, R. (2014). Microbial biosurfactants production, applications and future potential. Applied microbiology and biotechnology, 98(24): 9915-9926.

Banat, I. M., Satpute, S. K., Cameotra, S. S., Patil, R., & Nyayanit, N. V. (2021). Cost effective technologies and renewable substrates for biosurfactants' production: A review. Frontiers in Microbiology, 12, 708056.

Chen, S., Luo, Y., Hu, X., Zhang, Y., & Wang, X. (2020). Influence of biosurfactant-producing bacteria on metal availability and plant growth in contaminated soil. Ecotoxicology and Environmental Safety, 195, 110491.

Gutiérrez-Chávez, C., Jiménez-Islas, H., Sandoval-Cortés, J., & Fernández, F. J. (2021). Biosurfactants and their applications in agriculture. Agronomy, 11(5): 918.

Ebadi, A., Olamaee, M., Khoshkholgh Sima, N. A., Ghorbani Nasrabadi, R., & Hashemi, M. (2018). Isolation and characterization of biosurfactant producing and crude oil degrading bacteria from oil contaminated soils. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science, 42(3), 1149-1156.

Huang, W. E., Li, M., Jarvis, R. M., Goodacre, R., & Banwart, S. A. (2019). Bacterial biosurfactant: The frontier of microbial farming and bioremediation. Journal of Environmental Management, 234: 152-163.

Kiran, G. S., Sabarathnam, B., Selvin, J., Lipton, A. N., & Sujith, S. (2021). Sustainable biosurfactant production by marine microbes: New insights and applications in agriculture and environment. Agronomy for Sustainable Development, 41(1): 12.

Kumar, A., Singh, P., & Singh, R. (2022). Microbial biosurfactants in improving plant growth and nutrient uptake. Rhizosphere, 21: 100476.

Li, W., Zhang, Q., Zhang, H., & Wang, J. (2020). Enhanced phytoremediation of heavy metals in contaminated soils using biosurfactants: Mechanisms and prospects. Environmental Pollution, 263: 114562.

Marchant, R., & Banat, I. M. (2012). Biosurfactants: a sustainable replacement for chemical surfactants? Biotechnology Letters, 34(9): 1597–1605.

Marchut-Mikołajczyk, O., Chrzanowska, M., Żaba, K., & Ławniczak, Ł. (2023). Application of biosurfactants for improving the bioavailability of nutrients and contaminants: Challenges and opportunities. Journal of Environmental Management, 336: 117655.
Mnif, I., Ghribi, D., & Sayadi, S. (2022). Insights into biosurfactant-mediated bioavailability and uptake of nutrients and pollutants in soil–plant systems. Environmental Technology & Innovation, 27: 102447.
Mulligan, C. N. (2005). Environmental applications for biosurfactants. Environmental pollution, 133(2): 183-198.
Nitschke, M., & Costa, S. G. V. A. O. (2007). Biosurfactants in food industry. Trends in Food Science & Technology, 18(5): 252-259.
Nitschke, M., & Silva, S. S. (2018). Recent food applications of microbial surfactants. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 58(4): 631–638.
Ongena, M., & Jacques, P. (2008). Bacillus lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. Trends in Microbiology, 16(3): 115–125.
Pacwa-Płociniczak, M., Płaza, G. A., Piotrowska-Seget, Z., & Cameotra, S. S. (2011). Environmental applications of biosurfactants: recent advances. International journal of molecular sciences, 12(1): 633-654.
Rashedi, H., Jamali, H. A., & Fazaeli, R. (2021). Potential of biosurfactant-producing bacteria in zinc solubilization and plant growth promotion. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21(3), 1736–1747.
Rodrigues, L., Moldes, A., Teixeira, J., & Oliveira, R. (2006). Kinetic study of fermentative biosurfactant production by Lactobacillus strains. Biochemical Engineering Journal, 28(2): 109-116.
Sachdev, D. P., & Cameotra, S. S. (2013). Biosurfactants in agriculture. Applied microbiology and biotechnology, 97: 1005–1016.
Sharma, M., Rana, A., & Sharma, A. (2023). Role of microbial biosurfactants in sustainable nutrient management and crop production. Agronomy, 13(1): 129.
Sharma, R., Singh, P., & Cameotra, S. S. (2022). Recent advances in microbial biosurfactants: Applications in agriculture and environmental sustainability. Environmental Advances, 9: 100249.
Singh, P., & Cameotra, S. S. (2004). Potential applications of microbial surfactants in biomedical sciences. Trends in biotechnology, 22(3): 142–146.
Singh, P., Sharma, R., & Cameotra, S. S. (2019). Biosurfactants: production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR). Petroleum, 5(4): 287-293.
Sobrinho, H. B. S., Luna, J. M., Rufino, R. D., & Sarubbo, L. A. (2023). Innovations in biosurfactant technology for sustainable agriculture. Biotechnology Reports, 40: e00811.

Biosurfactants role in enhancing the uptake of micronutrients by plants

Ali Ebadi[1*], Mehdi Nourzadeh Haddad[1], Hadi Rezaei Rad[1]
[1] Nuclear Science and Technology Research Institute, Nuclear Agriculture Research School,
[*]aebadi@aeoi.org.ir

Abstract
Biosurfactants, surface-active compounds produced by microorganisms, have emerged as sustainable alternatives to chemical inputs in modern agriculture due to their potential to enhance micronutrient bioavailability and reduce environmental impact. With their amphiphilic structure, these molecules can improve the uptake of essential micronutrients such as iron (Fe), zinc (Zn), copper (Cu), and manganese (Mn) through mechanisms including surface tension reduction, metal chelation, and stimulation of beneficial rhizosphere microbiota. This review explores the major classes of biosurfactants—such as glycolipids and lipopeptides—their chemical structures, biological functions, and roles in facilitating plant nutrient acquisition. In addition, the paper addresses current limitations in the practical use of biosurfactants, including high production costs, limited environmental stability, and the lack of international regulatory standards. Recent advances in microbial engineering, nanotechnology, and controlled-release systems suggest a promising future for biosurfactants as

key components of next-generation biofertilizers and smart agricultural systems. Overall, biosurfactants hold great potential for improving soil health, nutrient use efficiency, and sustainability in future cropping systems.

Keywords: bioavailability, chelation, plant nutrition, surface active compound, surface tension