مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸

ISSN 2716-9804 الکترونیکی، ISSN 2717-0632 چاپی

سیدروفور و کاربردهای آن در حوزه‌ی پژوهش‌های زیست محیطی

فاطمه شهریاری [*۱] و رقیه مرادی [۲]

۱- استادیار، گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

shahryari@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۰۲ – تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۰

صفحه ۲۰-۱

چکیده

آهن یکی از عناصر ضروری کم مصرف برای تقریبا تمام موجودات زنده است که برای انتقال الکترون و فرایندهای متابولیکی مورد نیاز است. آهن فریک (Fe^{3+}) در طبیعت نامحلول است و در اسیدیته فیزیولوژیک (۷/۴۰ـ۷/۳۵) غیر قابل دسترس است. در شرایط کمبود آهن ترکیبات کلاته‌کننده آهن نظیر سیدروفورها توسط بسیاری از باکتری‌ها و برخی از قارچ‌ها ساخته می‌شوند. سیدروفورها تمایل زیادی به جذب آهن یا سایر فلزات دارند. در سال‌های گذشته به‌خاطر کاربردهای بالقوه‌ی سیدروفورها در زمینه‌های مختلف توجه فراوانی به آن‌ها شده است. سیدروفورها در اکولوژی میکروبی موجب افزایش رشد تعداد زیادی از میکروارگانیسم غیرقابل کشت می‌شوند و قادر به تغییر جمعیت میکروبی خاک هستند. سیدروفورها در کشاورزی به‌عنوان محرک رشد گیاه و برای افزایش عملکرد از راه بهبود جذب آهن و یا عامل بیوکنترل بالقوه پاتوژن‌های گیاهی استفاده می‌شوند. سیدروفورها می‌توانند جایگزین مناسبی برای آفت‌کش‌های شیمیایی باشند. همچنین سیدروفورها در زیست‌پالایی نمونه‌های آلوده به فلزات سنگین و به‌عنوان حسگر زیستی نیز کاربرد دارند. در این مقاله کاربردهای مختلف این مولکول‌های کلاته‌کننده آهن بیان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آهن، اکولوژی میکروبی، بیوکنترل، حسگر زیستی، زیست‌پالایی.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

مقدمه

آهن از نظر فراوانی در پوسته زمین پس از اکسیژن، سیلیسیم و آلومینیوم چهارمین عنصر است (۵/۶ درصد) و در همه خاک‌ها یافت می‌شود (۱). آهن در چندین فرآیند متابولیکی از جمله چرخه کربس، زنجیره انتقال الکترون، فسفریلاسیون اکسیداتیو و فتوسنتز ضروری است (۲). هم‌چنین بیوسنتز پورفرین‌ها، ویتامین‌ها، آنتی‌بیوتیک‌ها، توکسین‌ها، سیتوکروم‌ها، سیدروفورها، رنگدانه‌ها، ترکیبات آروماتیک و اسیدهای نوکلئیک را تنظیم می‌کند (۳).

قابلیت استفاده از آهن توسط گیاهان به میزان و هم‌چنین شکل‌های مختلف آن در خاک، اسیدیته خاک و سایر عوامل وابسته است. به‌نحوی که فعالیت آهن سه ظرفیتی به ازای هر واحد افزایش در اسیدیته خاک هزار برابر کم می‌شود. علی‌رغم فراوانی آهن در خاک‌ها، کمبود آن به‌دلیل حلالیت کم، مهم‌ترین مشکل خاک‌های قلیایی و آهکی است که رشد گیاهان را محدود می‌کند. چون آهن در فعالیت‌های فیزیولوژیکی مهم گیاه موثر است، بنابراین فقر آن به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای موجب کاهش کمیت و کیفیت محصول و در نتیجه کاهش میزان تولید و تغییر ماهیت شبکه غذایی اکوسیستم‌ها است (۱).

سیدروفورها (Siderophore)

تقریبا تمام میکروارگانیسم‌های قابل کشت به جز لاکتوباسیلوس‌ها در شرایط کمبود آهن در محیط قادر به تولید سیدروفور هستند. بسیاری از باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی اختیاری، میکروارگانیسم‌های آبزی نظیر فیتوپلانکتون و سیانوباکتری‌ها، قارچ‌ها و ریشه‌های گیاهان سیدروفور تولید می‌کنند (۴). آهن‌بَرها یا سیدروفورها، مولکول‌های کوچک (کمتر از ۱۰۰۰ دالتون) کلاته‌کننده آهن هستند (۵).

اگرچه وظیفه اصلی سیدروفور به دام انداختن فلز آهن است، اما قادر به تشکیل کمپلکس با سایر عناصر ضروری نظیر نیکل (Ni)، کروم (Co)، منگنز(Mn) و مولیبدن (Mo) محیط نیز بوده و موجب افزایش قابلیت دسترسی سلول میکروبی به این عناصر می‌شود (۶، ۷).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

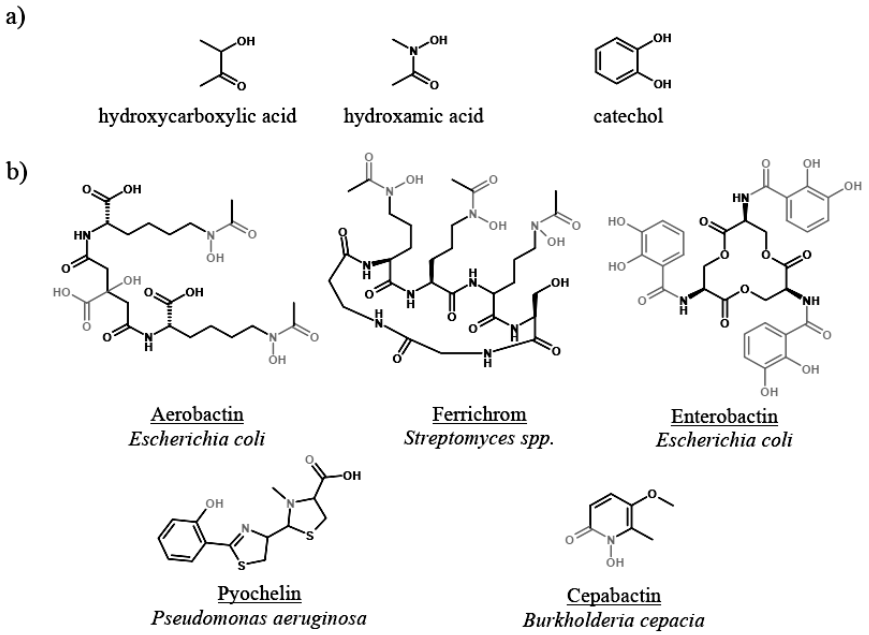
[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

وقتی سیدروفور روی اندام‌های هوایی گیاه پاشیده شود و یا در خاک به‌کار رود به‌طور سیستمیک جذب گیاه شده و باعث القای مقاومت علیه آفات، بیماری‌ها و هم‌چنین تنش‌های خشکی و شوری می‌شود. بیان پروتئین‌های دفاعی از مهم‌ترین سازوکارهای القای مقاومت توسط سیدروفورها است (۸). تاکنون بیش از ۵۰۰ نوع سیدروفور گزارش و ۲۷۰ نوع آن به‌طور کامل شناسایی شده است (۹، ۱۰). برخی از باکتری‌ها بیش از یک نوع سیدروفور تولید می‌کنند که این ویژگی موجب افزایش کاربرد سیدروفورها می‌شود. بر اساس ساختار مولکولی و نوع پیوندها، سیدروفورها به گروه‌های اصلی (لیگاند) کاتکول یا فنولات، هیدروکسامات و کربوکسیلات طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۱a). این لیگاندها (مولکول یا یونی که به فلز مرکزی متصل شده و تشکیل کمپلکس دهد) به‌ترتیب در سیدروفورهای انتروباکتین (Enterobactin)، فری‌کروم (Ferrichrom) و ائروباکتین (Aerobaction) وجود دارند که توسط جدایه‌های باکتریایی سنتز می‌شوند. در ساختار برخی از سیدروفورها مانند پیووردین (Pyoverdine) و سودوباکتین (Pseudobactin) لیگاندهای اصلی کاتکول و هیدروکسامات وجود دارد. همچنین برخی از سیدروفورها مانند اگروباکتین (Agrobactin) و پیوچلین (Pyochelin) علاوه بر لیگاند اصلی (کاتکول یا فنل) دارای لیگاندهای دیگری نیز هستند. در برخی از این ترکیبات، بخش‌های کلاته‌کننده آهن از طریق ستون کربنی به یکدیگر متصل می‌شوند تا سیدروفور خمش‌پذیری و انعطاف لازم برای کلاته‌کردن آهن فلزی با نسبت ۱:۱ از آهن فریک‌ـسیدروفور را به‌دست آورد. نسبت‌های متفاوتی از آهن‌ـسیدروفور نیز ممکن است وجود داشته باشد. به‌عنوان مثال سیدروفور سپاباکتین (Cepabaction) باکتری Burkholderia cepacia دارای نسبت آهن فریک‌ـسیدروفور ۱:۳ است درحالیکه برای سیدروفور پیوچلین به‌خاطر وجود اتم نیتروژن در حلقه دی هیدروتیازول این نسبت ۱:۲ است (شکل ۱b). هیدروکسامات‌ها متداول‌ترین

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

سیدروفورهای موجود در طبیعت هستند که بیش‌ترین غلظت را در خاک دارند و اغلب توسط اعضای انتروباکتریاسه و اکتینومیست‌ها تولید می‌شوند. همچنین بیشتر سیدروفورهای تولید شده توسط قارچ‌ها از این نوع است (۱۰). کاتکول‌ها توسط باکتری‌های خاصی تولید می‌شوند و بالاترین میل ترکیبی به آهن متعلق به این گروه است (۱۱). کربوکسیلات‌ها یا ریزوباکتین‌ها در باکتری‌ها (*Rhizobium* spp. و *Staphylococcus* spp.) و قارچ‌ها (*Mucor* spp.) تولید می‌شوند (۱۲) (جدول ۱).



شکل ۱: سه گروه اصلی کلاته‌کننده آهن (A)، ساختار سیدروفورهای مختلف باکتریایی، گروه‌های آلی کلاته‌کننده آهن خاکستری شده‌اند (B) (۲).

جدول ۱: لیست میکروارگانیسم‌های تولیدکننده انواع مختلف سیدروفورها (۱۰)

Types of siderophore	Name of siderophore	Siderophore-producing microorganism
Hydroxamate	Ferribactin	*Pseudomonas fluorescens*
	Unknown	*Pseudomonas fluorescens*
	Dimerum acid, fusigen, coprogen, ferricrocin	*Trichoderma spp.*

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

	Fusarinine A&C	*Fusarium roseum*
	Fusarinine B	
	Unknown	*Escherichia coli*
	Unknown	*Pseudomonas putida*
	Unknown	*Bacillus silvestris*
	Unknown	*Aspergillus niger*
	Unknown	*Rhizopus oryzae*
	Unknown	*Candida albicans*
	Ferrirubin	*Paecilomyces variotii*
	Ferrichrome	*Ustilago sphaerogena*
	Desferrioxamine B	*Streptomyces pilosus*
	Desferrioxamine B, desferrioxamine E	*Streptomyces coelicolor*
	Ornibactin	*Burkholderia cepacia*
	Desferrioxamine mesylate	*Streptomyces pilosus*
	Unknown	*Penicillium chrysogenum*
	Unknown	*Penicillium funiculosum*
	Unknown	*Aspergillus nidulans*
	Unknown	*Aspergillus niger*
	Unknown	*Aspergillus ochraceus*
	Photobactin	*Photorhabdus luminescens*
	Vibriobactin	*Vibrio cholera*
	Unknown	*Rhizopus sp.*
Catecholate	Enterobactin	*Escherichia coli*
	Unknown	*Escherichia coli*
	Pyoverdine	*Pseudomonas aeruginosa*
	Salmochelins	*Salmonella enterica*
	Bacillibactin	*Bacillus anthracis*
	Bacillibactin	*Bacillus subtilis*
	Petrobactin, Bacillibactin	*Bacillus cereus, Bacillus anthracis*
	Bacillibactin	*Bacillus thuringiensis*
	Vibriobactin	*Vibrio cholera*
	Unknown	*Pseudomonas fluorescens*
	Unknown	*Aspergillus flavus*
	Unknown	*Rhizopus sp.*
	Enterobactin	*Streptomyces sp.*
	Photobactin	*Photorhabdus luminescens*
	Unknown	*Synechococcus sp.*

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

		Acinetobacter calcoaceticus
	Unknown	
	Unknown	*Mesorhizobium sp.*
Carboxylate	Rhizobactin	*Rhizobium meloti*
	Staphyloferrin A	*Staphylococcus hyicus*
	Staphyloferrin A, Staphyloferrin B	*Staphylococcus aureus*
		Halococcus saccharolyticus
	Unknown	
		Halorubrum saccharovorum
	Unknown	
		Haloterrigena turkmenica
	Unknown	
	Rhizoferrin	*Rhizopus microspores, Basidiobolus microspores*
	Rhizoferrin	*Mucor mucedo, Phycomyces nitens*
	Rhizoferrin	*Chaetostylum fresenii, Cokeromyces recurvatus*
	Rhizoferrin	*Cunninghamella elegans, Mycotypha africana*

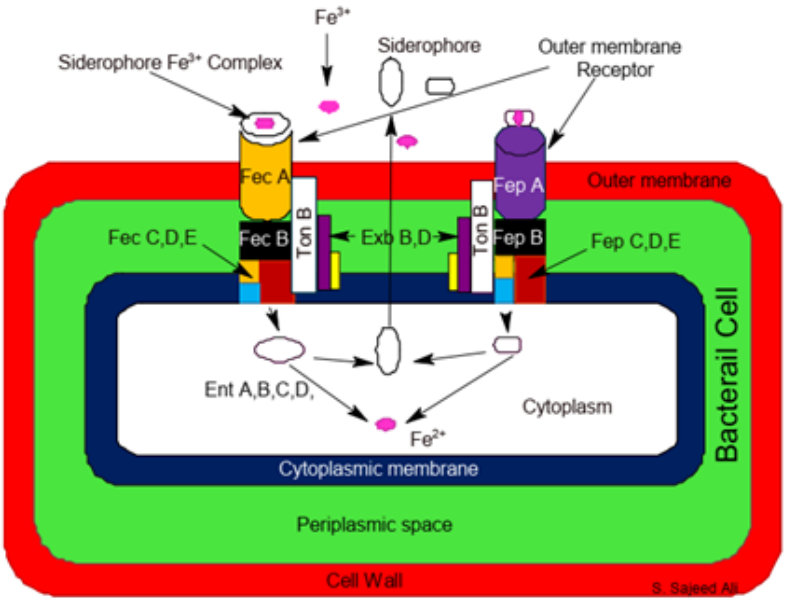
سیستم‌های انتقال آهن وابسته به سیدروفور در باکتری‌ها

جذب آهن فریک توسط سیدروفورها فرایندی وابسته به انرژی است که طی آن میکروارگانیسم‌ها از انواع سیستم‌های انتقال آهن استفاده می‌کنند. سیستم‌های انتقال بین باکتری‌های گرم مثبت و منفی متفاوت است و چنین سیستم‌هائی در *Escherichia coli* به‌طور کامل مطالعه شده‌است. سیدروفورها تنها یک بخش از اجزاء سیستم چند ترکیبی انتقال آهن فریک به داخل سلول هستند. سایر ترکیبات سیستم انتقال در این باکتری شامل پروتئین‌های گیرنده غشاء خارجی (Fec A و Fep A)، کمپلکس پروتئینی TonB-ExbB-ExbD در غشاء داخلی، پروتئین‌های متصل‌شونده در پری‌پلاسم و پروتئین‌های Fec C, D, E- Fep C, D, E وابسته به سیستم انتقال ABC (ATP-binding cassette transporter) در غشاء داخلی است (شکل ۲) (۱۳). در شرایط کمبود آهن، باکتری سیدروفور تولید می‌کند و تعداد مولکول‌های گیرنده را افزایش می‌دهد. سیدروفورها خارج از سلول تشکیل کمپلکس آهن-سیدروفور را می‌دهند. در گام نخست کمپلکس به

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

گیرنده‌های غشاء خارجی Fec A و Fep A متصل می‌شود. در مرحله دوم به کمک سیستم انتقال ABC شامل Fec C, D, E و Fep C, D, E کمپلکس به فضای سیتوپلاسم منتقل می‌شود. جفت‌شدن دو پروتئین این سیستم به‌صورتی است که امکان فعالیت هم‌زمان پرمئازی و هیدرولیز ATP جهت تامین انرژی لازم برای انتقال را فراهم می‌کند (۱۴). پس از انتقال به فضای سیتوپلاسمی، رها شدن کمپلکس آهن-سیدروفور درون سیتوپلاسم به‌کمک پروتئین غشائی Ton B صورت می‌گیرد. جداشدن آهن از کمپلکس در سیتوپلاسم از طریق مکانیسم ناشناخته‌ای که احتمالا مستلزم تخریب هیدرولیتیکی مولکول سیدروفور یا احیاء Fe^{+3} از طریق NAD(P)H یا پروتئین ENT A, B, C, E است، انجام می‌شود و در نهایت با توجه به اینکه Fe^{+2} تمایل زیادی به سیدروفور ندارد ازکمپلکس رها می‌شود (۱۴، ۱۵، ۱۶،۱۷) (شکل ۲).



شکل ۲: سیستم چند ترکیبی انتقال کمپلکس آهن-سیدروفور در باکتری: جذب آهن به‌واسطه سیدروفور فرآیند وابسته به انرژی و گیرنده است. سیدروفورها بخشی از اجزاء سیستم انتقال آهن‌فریک به‌داخل سلول هستند. سایر ترکیبات این سیستم شامل پروتئین‌های گیرنده غشاءخارجی Fec A و Fep A، کمپلکس پروتئینی TonB-ExbB-ExbD غشاءداخلی، پروتئین متصل‌شونده پری‌پلاسمی و پروتئین Fec C, D, E و Fep C, D, E, وابسته‌به ATP است (۲).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

در باکتری‌های گرم مثبت (مثل *Bacillus* spp.) که فاقد غشاء خارجی و گیرنده‌های غشاء خارجی هستند، انتقال کمپلکس سیدروفور-آهن (III) به‌واسطه پروتئین متصل‌شونده در پری‌پلاسم مستقر در غشاء سلولی صورت می‌گیرد. سپس کمپلکس سیدروفور-آهن (III) توسط سیستم انتقال ABC مشابه باکتری‌های گرم منفی به سیتوپلاسم منتقل می‌شود(۱۸).

سیدروفورهای گیاهی

گیاهان گرامینه نظیر گندم و جو تحت شرایط کمبود آهن جهت گرفتن آهن از منابع نامحلول، ترکیبات کلاته‌کننده آهن با نام سیدروفور گیاهی (phytosiderophore) تولید می‌کنند که کمپلکس‌های اختصاصی قوی با آهن (III) تشکیل می‌دهند (۱۹). اولین و متداول‌ترین سیدروفور گیاهی شناخته شده، آمینو اسید غیرپروتونی موگینیک اسید (Mugineic acid) است (۲۰). سیدروفورهای دیگری از گیاهان گرامینه نظیر آونیک اسید آ (Avenic acid A) از یولاف و دیستیچونیک اسید (Distichonic acid) از جو جداسازی شده است (۲۱). وزن مولکولی سیدروفورهای میکروبی ۲۰۰۰-۲۰۰ دالتون است، در حالی‌که وزن مولکولی سیدروفورهای گیاهی بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ دالتون است (۲۲).

کاربرد سیدروفورها در حوزه‌ی اکولوژی میکروبی

سیدروفورها منجر به افزایش رشد میکروارگانیسم‌های غیرقابل کشت (unculture microorganism) در شرایط آزمایشگاهی می‌شوند. یکی از مشکلات اصلی در حوزه‌ی میکروبیولوژی این است که از بین جوامع میکروبی محیط‌های طبیعی تنها ۱-۰/۱ درصد آن‌ها در شرایط آزمایشگاهی روی محیط‌های مصنوعی قابل کشت هستند و بیش‌تر جمعیت میکروبی به شکل غیر قابل کشت باقی می‌ماند. از جمله مهم‌ترین دلایل بروز این معضل عدم توانایی میکروبیولوژیست‌ها در فراهم کردن برخی از نیازمندی‌های اساسی نظیر درجه حرارت، شوک اسموتیک و اسیدیته در محیط‌های رشد غیرطبیعی یا مصنوعی است. در شرایط

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

آزمایشگاهی افزودن سیدروفور به‌عنوان مکمل به محیط کشت به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای رشد و کشت باکتری‌های غیرقابل کشت را ارتقاء می‌دهد. البته بسیاری از سویه‌های غیرقابل کشت وابسته به تولید و رهاسازی ترکیبات سیدروفور توسط میکروارگانیسم‌های موجود در محیط مجاور هستند (۲۳). به‌طور مثال باکتری قابل کشت *Micrococcus luteus* KLE1011 پنج سیدروفور آسیل دزفری‌اکسامین (acyldesferrioxamine) تولید می‌کند که موجب بهبود قابل‌ملاحظه در رشد باکتری غیرقابل کشت *Maribacter polysiphoniae* KLE1104 می‌شود (۱۵).

قلمرو تاکسونومی میکروبی

سیدروتایپینگ (siderotyping) به‌عنوان ویژگی‌های مورد بررسی سویه‌های باکتریایی با توجه به انواع سیدروفورهای تولید شده توسط آن‌ها تعریف می‌شود (۲۴). در مطالعه‌ای سیدروتایپینگ در مورد ۴۰۰ سویه فلورسنت و غیرفلورسنت گونه‌های سودوموناس استفاده شد و سویه‌ها بر اساس نتایج به‌دست آمده به ۲۸ گروه شامل ۱۵ گونه کاملا شناخته‌شده گروه‌بندی شدند (۲۵). باکتری‌های سودوموناس علاوه بر انواع مختلف سیدروفور، بیش از ۶۰ نوع مختلف پیووردین تولید می‌کنند. زنجیره پپتید در این سیدروفور فلورسنت در میان گونه‌های مختلف سودوموناس متفاوت است و این تنوع می‌تواند جهت شناسائی روابط گونه‌های مختلف باکتری استفاده شود (۲۶).

سیدروفورها و جوامع میکروبی خاک

بسیاری از باکتری‌های مفید خاک‌زی نقش مستقیمی در افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه ندارند، بلکه به‌واسطه فرایندهایی از قبیل تولید هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد گیاه، ویتامین، سیدروفور و غیره سبب بهبود عملکرد می‌شوند. نتایج پژوهش‌ها نشان‌داده است که مقدار آهن می‌تواند ساختار جامعه میکروبی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تغییر دهد. میکروارگانیسم‌های خاک در شرایط کمبود آهن ($Fe^{3+}<10\mu M$) با ترشح سیدروفور که کمپلکس پایداری با آهن (III) دارد،

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

آن را به‌صورت محلول و قابل‌دسترس در می‌آورند. افزایش دسترسی میکروارگانیسم‌ها به آهن ممکن است موجب افزایش تکثیر جمعیت میکروبی خاک شود. بنابراین نقش سیدروفور در تجزیه مواد معدنی و دسترسی آهن نشان می‌دهد که افزودن این مواد جهت جبران مواد معدنی خاک‌های فرسایش‌یافته، می‌تواند با کمک به میکروارگانیسم‌ها در تغییر ساختار جوامع باکتریایی خاک موثر باشد (۹).

ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)

گروهی از باکتری‌های مفید ریزوسفری که باعث افزایش رشد گیاه می‌شوند، باکتری‌های محرک رشد گیاه نامیده می‌شوند (۲۷). امروزه استفاده از PGPR در کشاورزی به‌عنوان روشی جایگزین برای کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و مکمل‌ها در راستاء جلوگیری از آلودگی محیط زیست در حال افزایش است (۲۸). ریزوباکتری‌های کلونیزه‌کننده‌ی ریشه نقش مهمی در منطقه ریزوسفر ایفاء می‌کنند و با روش‌های مختلف شامل انحلال ترکیبات کم محلول و نامحلول عناصر غذایی و در نتیجه افزایش دسترسی آن‌ها، تثبیت نیتروژن، کنترل بیمارگرهای گیاهی با تولید سیانید هیدروژن، ترکیبات ضدمیکروبی و رقابت برای جذب عناصر غذایی و تولید سیدروفور باعث افزایش رشد گیاه می‌شوند (۲۹). باکتری‌های متعلق به جنس سودوموناس به خصوص سودوموناس‌های فلورسنت مهم‌ترین باکتری‌های افزایش‌دهنده‌ی رشد گیاه هستند، که با تولید سیدروفور نقش بسزایی در افزایش تحرک و قابلیت جذب آهن در شرایط کمبود و هم چنین رشد گیاه دارند (۲۷). نتایج بررسی تاثیر سیدروفور روی رشد گیاهان ذرت و اسفناج نشان داد که سویه NSK2۷ باکتری *Pseudomonas aeruginosa* در مقایسه با سویه جهش‌یافته فاقد توانایی تولید سیدروفور تاثیر بیش‌تری در رشد گیاه داشت. این سویه با تولید پیووردین در محیط رشد ریشه باعث کاهش معنی‌دار جمعیت قارچی مستقر روی ریشه و ناحیه اندوریزوسفر شد (۳۰).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

سیدروفور و کنترل بیولوژیک بیمارگرهای گیاهی

بازدارندگی عوامل بیماری‌زای گیاهی به‌وسیله‌ی برخی متابولیت‌های میکروبی در سال ۱۹۰۸ در بیماری شناسی گیاهی مطرح شد. بسیاری از باکتری‌ها با تولید سیدروفورها، آنتی‌بیوتیک‌ها و سیانید هیدروژن موجب مهار رشد میکروارگانیسم‌های زیان‌آور می‌شوند (۳۱). بعضی میکروارگانیسم‌ها با تولید سیدروفور، آهن را از دسترس بیمارگرهای گیاهی خارج می‌کنند و در نتیجه نابودی پاتوژن‌های گیاهی را تسهیل می‌کنند. از این‌رو نقش بسزایی در واکنش‌های کنترل بیولوژیکی علیه پاتوژن‌های گیاهی خاص دارند (۵، ۳۲، ۳۳).

جنس‌های زیادی از باکتری‌ها در کنترل بیولوژیک قارچ‌ها و باکتری‌ها به‌خصوص در ناحیه ریزوسفر مشارکت فعال دارند. باکتری‌های متعلق به سودموناس‌های فلورسنت از قبیل *Pseudomonas fluorescens*، *P. putida* و تعدادی از گونه‌های جنس باسیلوس مثل *Bacillus cereus* و *B. subtilis* در کنترل بیماری‌های ریشه‌ی گیاهان زراعی موثر هستند (۳۴، ۳۵، ۳۶).

سیدروفورها و بهبود زیست‌پالایی فلزات سنگین

خاک‌ها ممکن است به‌واسطه انباشتگی سریع فلزات سنگین و متالوئیدهای ناشی از صنایع در حال رشد، حفاری معادن، دفع نامناسب پسماندهای فلزی، کاربرد ناصحیح کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها، آبیاری با پسماندها، ضایعات صنایع پتروشیمی و پسماندهای جوی آلوده شوند (۳۷). با توجه به افزایش رو به رشد صنایع جهانی از جمله دغدغه‌های اصلی حوزه‌ی محیط‌زیست، آلودگی بیوسفر توسط فلزات سمی است. کادمیوم(Cd) ، کروم (Cr^{3+})، مس (Cu) ، سرب (Pb^{2+})، جیوه (Hg) و نیکل (Ni) متداول‌ترین فلزات سنگین آلاینده محیط‌زیست هستند. فلزات موجود در خاک در مقادیر اندک به‌عنوان ریزمغذی برای گیاهان لازم هستند، اما انباشتگی وسیع فلزات سنگین برای بسیاری از گیاهان سمی است و موجب آلودگی خاک و کاهش فعالیت

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

جوامع میکروبی، حاصلخیزی خاک و عملکرد محصولات می‌شود (۳۸). همچنین آلودگی محیط‌های آبی و خاک با فلزات سنگین مشکلات عدیده‌ای برای سلامت انسان ایجاد می‌کند که از این‌رو سم‌زدایی و به حداقل رساندن مقدار منابع آلوده‌کننده ضروری است (۳۹، ۴۰). گرچه نقش اساسی سیدروفورها کلاته‌کردن آهن فریک است، با این حال سیدروفورها به واسطه قابلیت اتصال به طیف وسیعی از فلزات سنگین تاثیر مهمی در قابلیت انحلال و افزایش تحرک آن‌ها دارند و می‌توانند به‌عنوان فن‌آوری سازگار با محیط‌زیست برای زیست‌پالایی و سم‌زدایی نمونه‌های آلوده لحاظ شوند (۴۱، ۴۲). سیدروفور پیوچلین باکتری *P. aeruginosa* دامنه وسیعی از فلزات مانند Co^{2+}، Ag^{+}، Hg^{2+}، Cu^{2+}، Cr^{2+}، Cd^{2+}، Al^{3+}، Zn^{2+}، Pb^{2+}، Ni^{2+} و Mn^{2+} و ازتوچلین و ازتوباکتین باکتری *Azotobacter vinelandii* مولیبدن (Mo) و وانادیوم (V) را کلاته می‌کنند (۷). هم‌چنین فلزاتی نظیر آهن، نیکل و کبالت از پسماندهای معادن اورانیوم به کمک سیدروفور *P. fluorescens* به فرم معدنی قابل‌استفاده تبدیل شد (۴۳). علاوه‌بر سیدروفورهای میکروبی، سیدروفور گیاهی نیز در تجزیه زیستی فلزات در خاک نقش دارند. تمایل بالای سیدروفورهای گیاهی برای تشکیل کمپلکس با فلزات مختلف به این ترتیب $Cd^{2+}> Ni^{2+}> Pb^{2+}> Sn^{2+}> AsO_4^{-2}> AsO_2^{-1}> Mn^{2+}> Co^{2+}> Cu^{2+}> Fe^{+3}$ است. هم‌چنین باندهای بسیار ضعیفی با Al^{+3} و Cr^{+3} دارند (۴۴).

پاکسازی آلاینده‌های هیدروکربنی از محیط‌های آبی

وجود هیدروکربن‌های نفتی در اکوسیستم‌های آبزی یکی از مشکلات اصلی محیط‌زیست است و هیدروکربن‌های پلی‌سیکلیک آروماتیک به دلیل پایداری بالا در محیط زیست و اثرات زیان‌بار بر سلامت انسان بیش‌تر موردتوجه هستند (۴۵). میکروارگانیسم نقش مهمی در احیاء هیدروکربن‌های نفتی از محیط‌های آبی دارند. سیدروفور میکروبی با سازوکار غیرمستقیم از طریق تسهیل جذب آهن در شرایط کمبود آهن

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

برای میکروارگانیسم تجزیه‌کننده، در تجزیه زیستی هیدروکربن نفتی مشارکت می‌کنند (۴۶). تاکنون سیدروفورهایی از قبیل پتروباکتین (Petrobactin) از باکتری *Marinobacter hydrocarbonoclasticus*، و اکروباکتین (Ochrobactin) از *Vibrio* spp. شناسایی شده‌اند که در تجزیه هیدروکربن‌های نفتی نقش دارند (۴۷، ۴۸).

فرآوری مجدد سوخت‌های هسته‌ای

فرایند پورکس (Plutonium-Uranium Recovery by Extraction) روشی شیمیایی برای خالص‌سازی سوخت یا سلاح هسته‌ای است که به شکل تجاری به‌منظور فرآوری مجدد فرآورده‌های ناشی از شکافت هسته‌ای نظیر نپتونیوم (Np) و تیتانیم (Ti) استفاده می‌شود (۴۹). بر اساس مطالعات انجام گرفته سیدروفورها خاصیت احیاء پسماندهای رادیواکتیو و فرآوری مجدد سوخت هسته‌ای را دارند. گروه‌های عاملی آنیونیک سیدروفورهای هیدروکسامات یا کاتکول، دهنده قوی اکسیژن هستند و اکسودونورهای (oxodonors) محکمی تشکیل می‌دهند که به‌طور قوی به اسیدهای لویس (Lewis acids) متصل و نهایتا کمپلکس‌هائی با ثابت پایداری تقریبی $K= 10^{16}$ تشکیل می‌دهند (۵۰).

بیوسنسور یا حسگر زیستی

حسگرهای زیستی سیستم‌های شناسایی بیولوژیکی هستند که از ترکیب گیرنده حساس زیستی (bioreceptor) با مبدل‌های (transducer) مناسب تشکیل شده‌اند. اساس کار این وسیله برقراری اتصال مخصوص بین آنالیت موردنظر با عنصر شناساگر بیولوژیکی است. نتیجه این عمل متقابل تغییر در یک یا چند خصوصیت فیزیکی-شیمیایی محیط مانند تغییر اسیدیته، انتقال الکترون، تغییر جرم، انتقال حرارت، جذب یا آزادسازی گازها یا یون‌های مخصوص خواهد بود که به‌وسیله مبدل شناسایی و به سیگنال الکتریکی تبدیل شده و در نهایت به‌صورت عدد کمی نشان داده می‌شود. سیگنال تولیدشده به‌صورت مستقیم با غلظت آنالیت موجود در نمونه ارتباط دارد. هدف نهایی طراحی هر حسگر زیستی سهولت ارزیابی آنالیت در نقطه

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

بحرانی است (۵۱، ۵۲). سیدروفورهای دارای ثابت پایداری مطلوب با آهن (III) می‌تواند جهت تعیین دسترسی زیستی آهن در خاک‌ها یا آب اقیانوس‌ها استفاده شوند (۵۳). کمپلکس سیدروفور پیووردین باکتری *P. aeruginosa* با آهن (III) دارای ثبات پایداری بالا در حدود $K = 10^{32}$ است (۵۴). این حسگر زیستی می‌تواند نمونه را در حالت محلول (غلظت تشخیص ۱۰ ng/mL) یا ساکن (غلظت ردیابی ۳ ng/mL) شناسایی و تجزیه، تحلیل کند. این امر موجب شده است که پیووردین برای ساخت حسگر زیستی در نظر گرفته شود (۵۵). هم‌چنین سیدروفور ازتوباکتین باکتری *Azotobacter vinelandii* جهت مشابه‌سازی فرآیندهای جذب بیولوژیک به‌عنوان حس‌گر زیستی نوری آهن (III) استفاده شده است (۵۶).

سفیدسازی زیستی خمیرهای کاغذ

صنعت کاغذ و خمیرهای کاغذ منبع مهم ایجاد مشکلات زیست محیطی شامل گرمایش جهانی، سمیت برای انسان، سمیت زیست‌بوم، اکسیداسیون فتوشیمیایی، اسیدیفیکاسیون و نیتریفیکاسیون است (۵۷). فرآیند سفیدسازی مهم‌ترین مشکل صنایع کاغذ به‌شمار می‌رود. استفاده از ترکیبات سازگار با محیط مانند سیدروفور در صنعت کاغذ تا ۷۰ درصد از نیازهای شیمیایی لازم برای سفیدسازی را کاهش می‌دهد (۵۸). قارچ عامل پوسیدگی قهوه‌ای یکی از مهم‌ترین عوامل پوسیدگی چوب است. برخی از مطالعات، تولید سیدروفورهایی از نوع هیدروکسامات و کاتکول توسط قارچ عامل پوسیدگی چوب (*Gloephyllum trabeum*) را گزارش کرده‌اند. برای مثال هیدروکسامات جداشده از این قارچ توانایی احیاء آهن در چرخه‌ی اکسیداسیون و احیاء (redox) را دارد. متعاقبا آهن احیاء شده با پراکسیدهیدروژن واکنش می‌دهد و اکسیژن رادیکال تولید می‌شود که سلولز، همی سلولز و لیگنوسلولز را دپلیمره می‌کنند. فرآیند دپلیمریزاسیون نقش اساسی سیدروفور در سفیدکردن زیستی خمیرهای کاغذی است (۵۹، ۶۰).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

نتیجه‌گیری

آهن عنصر حیاتی موردنیاز موجودات زنده برای انجام فرآیندهای سلولی متعدد است. سیدروفورها توسط بسیاری از گیاهان و میکروارگانیسم‌ها تحت شرایط کمبود آهن تولید می‌شوند و نقش اساسی در جذب این عنصر و بقاء میکروارگانیسم دارند. سیدروفورها نه تنها در تغذیه میکروارگانیسم و گیاهان نقش دارند، بلکه به‌عنوان عوامل بالقوه قابل کاربرد در حوزه‌های مختلف بوم‌شناسی، کشاورزی، حسگر زیستی، زیست‌پالایی و پزشکی مطرح هستند. با توجه به کارکردهای متنوع سیدروفورها نیاز به شناسایی اختصاصی سیدروفورها از زیستگاه‌های مختلف نظیر اعماق دریا، بیابان‌ها و جنگل‌ها ضروری است. پژوهش بیش‌تر برای استفاده موثر از سیدروفور در زیست‌پالایی و بیوکنترل می‌تواند موجب افزایش کاربرد آن‌ها در حوزه‌ی زیست محیطی شود.

فهرست منابع

References

1. Sharifi R., Alizadeh H.R., Ahmadzadeh M. and Rasouli Sadaghiani M.H.. (2017). Investigation of different methods in siderophore measurement in indigenous fluorescent pseudomonads. Biological Journal of Microorganism. 21: 97-106. (In Persian with English abstract).

2. Fardeau S., Mullie C., Dassonville-Klimpt A., Audic N., Sasaki A. and Sonnet P. (2011). Bacterial iron uptake: a promising solution against multidrug resistant Bacteria. In: Méndez-Vilas A. (Ed.), Science against Microbial Pathogens: Communicating Current Research and Technological Advances. FORMATEX. pp. 695–705.

3. Messenger A. and Barclay R. (1983). Bacteria, iron and pathogenicity. Biochemical Education. 11:54–63.

4. Saharan B.S. and Nehra V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. Life Sciences and Medicine Research. 21:1–30.

5. Ahmed E. and Holmstrom S.J.M. (2014). Siderophores in environmental research: roles and applications. Microbial Biotechnology. 7:196–208.

6. Bellenger J.P., Wichard T., Kustka A.B. and Kraepiel A.M.L. (2008). Uptake of molybdenum and vanadium by a nitrogen-fixing soil bacterium using siderophores. Nature Geoscience. 1: 243–246.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

7. Braud A., Jézéquel K., Bazot S. and Lebeau T. (2009). Enhanced phytoextraction of an agricultural Cr- and Pb-contaminated soil by bioaugmentation with siderophore-producing bacteria. Chemosphere. 74:280–286.

8. Justyna P.G. and Ewa K. (2013). Induction of resistance against pathogens by β-aminobutyric acid. Acta Physiologiae Plantarum. 35: 1735-1748.

9. Jin C.W., Ye Y.Q. and Zheng S.J. (2014). An underground tale: contribution of microbial activity to plant iron acquisition via ecological processes. Annals of Botany. 113:7–18.

10. Saha M., Sarkar S., Sarkar B., Sharma B.K., Bhattacharjee S. and Tribedi P. (2015). Microbial siderophores and their potential applications: a review. Environmental Science and Pollution Research. 23:3984-3999.

11. Dave B.P., Anshuman K. and Hajela P. (2006). Siderophores of halophilic archaea and their chemical characterization. Indian Journal of Experimental Biology. 44: 340–344.

12. Dave B.P. and Dube H.C. (2000). Chemical characterization of fungal siderophores. Indian Journal of Experimental Biology. 38:56–62.

13. Matzanke B.F, Berner I., Bill E., Trautwein A.X. and Winkelmann G. (1991). Transport and utilization of ferrioxamine-E-bound iron in *Erwinia herbicola* (*Pantoea agglomerans*). Biology of Metals. 4: 181–185.

14. Shahryari F., Khodakaramian G. and Heydari A. (2006). Characterization of *Pseudomonas fluorescens* biovars isolated from main potato growing in Iran and evaluation of their antibiotic and siderophore production. Iranian Journal of Agricultural Sciences. 36: 849-857. (In Persian with English abstract).

15. Bou-Abdallah F. (2010). The iron redox and hydrolysis chemistry of the ferritins. Biochimica et Biophysica Acta (BBA). 1800:719–731.

16. Krewulak K.D. and Vogel H.J. (2008). Structural biology of bacterial iron uptake. Biochimica et Biophysica Acta. 1778:1781–1804.

17. Noinaj N., Guillier M., Barnard T.J. and Buchanan S.K. (2010). Ton B-dependent transporters: regulation, structure, and function. Annual Review of Microbiology. 64:43–60.

18. Davidson A.L. and Nikaido H. (1991). Purification and characterization of the membrane-associated components of the maltose transport system from *Escherichia coli.* Journal of Biological Chemistry. 4: 181-185.

19. Kraemer S.M., Crowley D.E. and Kretzschmar R. (2006). Geochemical aspects of phytosiderophore promoted iron acquisition by plants. Advances in Agronomy. 91: 1–46.

20. Takemoto T., Nomoto K., Fushiya S., Ouchi R., Kusano G., Hikino H. Takagi S., Matsuura Y. and Kakudo M. (1978). Structure of mugineic acid, a new amino acid possessing an iron-chelating activity from roots washings of water-cultured *Hordeum vulgare* L. Proceedings of the Japan Academy. B 54: 469–473.

21. Nomoto K., Mino Y., Ishida T., Yoshioka H., Ota N., Inoue M., Takagi S. and Takemoto T. (1981). X-ray crystal structure of the copper (II) complex of mugineic acid, a

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

naturally occurring metal chelator of graminaceous plants. Journal of the Chemical Society, Chemical Communications. 7: 338–339.

22. Gamit D.A. and Tank S.K. (2014). Effect of siderophore producing microorganism on plant growth of *Cajanus cajan* (Pigeon pea). International Journal of Research in Pure and Applied Microbiology. 4:20–27.

23. D'Onofrio A., Crawford J.M., Stewart E.J., Witt K., Gavrish E., Epstein S., Clardy J. and Lewis K. (2010). Siderophores from neighboring organisms promote the growth of uncultured bacteria. Chemical Biology. 17:254–264.

24. Bosne S. and Levy Frebault V. (1992). Mycobactin analysis as an aid for the identification of *Mycobacterium fortuitum* and *Mycobacterium chelonae* subspecies. Journal of Clinical Microbiology. 30:1225–1231.

25. Meyer J.M., Geoffroy V.A., Baida N., Gardan L., Izard D., Lemanceau Ph., Achouak W. and Palleroni N.J. (2002). Siderophore typing, a powerful tool for the identification of fluorescent and nonfluorescent pseudomonads. Applied and Enviromental Microbiology. 68: 2745–2753.

26. Schalk I.J. and Guillon L. (2012). Pyoverdine biosynthesis and secretion in *Pseudomonas aeruginosa*: implications for metal homeostasis. Environmental Microbiology. 15(6):1661–1673 .

27. Picard C., Di Cello F., Ventura M., Fani R. and Guckert A. (2000). Frequency and biodiversity of 2,4-diacetylphloroglucinol-producing bacteria isolated from the maize rhizosphere at different stages of plant growth. Applied and Environmental Microbiology. 66: 948–955.

28. Etminani F., Etminani A. and Harighi B. (2016). Role of endophytic bacteria in sustainable agriculture. Plant Pathology Science. 5:71-80. URL: http://yujs.yu.ac.ir/pps/article-1-120-fa.html.

29. Glick B.R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. Microbiological Research. 169: 30- 39.

30. Seong K.Y., Höfte M. and Verstraete W. (1992). Acclimatization of plant growth promoting *Pseudomonas* strain 7NSK2 in soil: effect on population dynamics and plant growth, Soil Biology and Biochemistry. 24: 751-758.

31. Husen E. (2003). Screening of soil bacteria for plant growth promotion activities *in vitro*. Indonesian Journal of Agricultural Science. 4:27-31.

32. Beneduzi A., Ambrosini A. and Passaglia L.M. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. Genetics and Molecular Biology. 35:1044–1051.

33. Shahryari F., Khodakaramian G. and Heydari A. (2006). Characterization of *Pseudomonas fluorescens* biovars isolated from main potato growing in Iran and evaluation of their antibiotic and siderophore production. Iranian Journal of Agricultural Sciences. 36: 849-857. (In Persian with English abstract).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

34. Olorunleke F.E., Kieu Phuong P. and and Höfte M. (2015). Recent advances in *Pseudomonas* biocontrol. In: Murillo J., Vinatzer B.A., Jackson R.W., Arnold D.L. (Ed.), Bacteria-Plant Interactions: Advanced Research and Future Trends. Caister Academic Press. pp. 167-198.

35. Shahryari F., Khodakaramian G. and Heydari A. (2005). Assessment of antagonistic activity *Pseudomonas fluorescens* biovars toward *Pectobacterium carotovorum* subsp. atrosepticum. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 8: 201-211. (In Persian with English abstract).

36. Yu X., Ai C., Xin L. and Zhou G. (2011).The siderophore producing bacterium, *Bacillus subtilis* CAS15, has a biocontrol effect on Fusarium wilt and promotes the growth of pepper. European Journal of Soil Biology. 47:138–145.

37. Khalid S., Shahid M., Niazi N.K., Murtaza B., Bibi I. and Dumat C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. Journal of Geochemical Exploration. 182, 247-268.

38. Flora G., Gupta D. and Tiwari A. (2012). Toxicity of lead: a review with recent updates. Interdisciplinary Toxicology. 5: 47-58.

39. Pierart A., Shahid M., Séjalon-Delmas N. and Dumat C. (2015). Antimony bioavailability: knowledge and research perspectives for sustainable agricultures. Journal of Hazardous Materials. 289: 219–234.

40. Xiong T., Austruy A., Pierart A., Shahid M., Schreck E., Mombo S. and Dumat C. (2016). Kinetic study of phytotoxicity induced by foliar lead uptake for vegetables exposed to fine particles and implications for sustainable urban agriculture. Journal of Environmental Sciences. 46:16–27.

41. Nair A., Juwarkar A.A. and Singh S.K. (2007). Production and characterization of siderophores and its application in arsenic removal from contaminated soil. Water, Air, and Soil Pollution. 180:199–212.

42. Rajkumar M., Ae N., Prasad M.N.V. and Freitas H. (2010). Potential of siderophore producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. Trends in Biotechnology. 28:142–149 .

43. Edberg F., Kalinowski B.E., Holmstrom S.J. and Holm K. (2010). Mobilization of metals from uranium mine waste: the role of pyoverdines produced by *Pseudomonas fluorescens*. Geobiology. 8:278–292.

44. Ruggiero C.E., Neu M.P. and Vanderberg L.A. (1999). Plutonium and uranium interactions with siderophores of aerobic soil microbes. Journal of Inorganic Biochemistry. 74: 282.

45. Das N. and Chandran P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. Biotechnology Research International. 11: 1–13.

46. Barbeau K., Zhang G.P., Live D.H. and Butler A. (2002). Petrobactin, a photoreactive siderophore produced by the oil-degrading marine bacterium *Marinobacter hydrocarbonoclasticus*. Journal of the American Chemical Society. 124: 378–379.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

47. Gauglitz J.M., Zhou H. and Butler A. (2012). A suite of citrate-derived siderophores from a marine *Vibrio* species isolated following the Deepwater Horizon oil spill. Journal of Inorganic Biochemistry. 107: 90–95 .

48. Hickford S.J.H., Küpper F.C., Zhang G., Carrano C.J., Blunt J.W. and Butler A. (2004). Petrobactin sulfonate, a new siderophore produced by the marine bacterium *Marinobacter hydrocarbonoclasticus*. Journal of Natural Products. 67: 1897–1899.

49. Birkett J.E., Carrott M.J., Fox O.D., Jones C.J., Maher C.J., Roube C.V., Taylor R.J. and Woodhead D.A. (2005). Recent developments in the purex process for nuclear fuel reprocessing: complexant based stripping for Uranium/Plutonium separation. Chimia International Journal for Chemistry. 59:898–904 .

50. Jarvis N. and Hancock R. (1991). Some correlations involving the stability of complexes of transuranium metal ions and ligands with negatively charged oxygen donors. Inorganic Chimica Acta. 182: 229–232.

51. Chiadò A., Bosco F. and Marmo L. (2011). Preliminary studies for the use of bioluminescent bacteria in the development of wireless biosensors for environmental monitoring. Chemical Engineering Transactions. 24:1351–1356.

52. Gupta V., Saharan K., Kumar L., Gupta R., Sahai V. and Mittal A. (2008). Spectrophotometric ferric ion biosensor from *Pseudomonas fluorescence* culture. Biotechnology and Bioengineering. 100: 284–296.

53. Chung Chun Lam C.K.S., Jickells T.D., Richardson D.J. and Russell D.A. (2006). Fluorescence-based siderophore biosensor for the determination of bioavailable iron in oceanic waters. Analytical Chemistry. 78: 5040–5045.

54. Kurtz K.S. and Crouch S.R. (1991). Design and optimization of a flow-injection system for enzymatic determination of galactose. Analytica Chimica Acta. 254: 201–208.

55. Yoder M.F. and Kisaalita W.S. (2011). Iron specificity of a biosensor based on fluorescent pyoverdin immobilized in sol-gel glass. Journal of Biological Engineering. 5: 4–16.

56. Sharma M. and Gohil N.K. (2010). Optical features of the fluorophore azotobactin: applications for iron sensing in biological fluids. Engineering in Life Sciences. 10: 304 – 310.

57. Singh G., Ahuja N., Batish M., Capalash N. and Sharma P. (2008). Biobleaching of wheat straw-rich soda pulp with alkalophilic laccase from gamma-proteobacterium JB: optimization of process parameters using response surface methodology. Bioresource Technology. 99: 7472–7479.

58. Bajpai P. (2004). Biological bleaching of chemical pulps. Critical Reviews in Biotechnology. 24: 1–58.

59. Arantes V. and Milagres A.M.F. (2007). The effect of a catecholate chelator as a redox agent in Fenton-based reactions on degradation of lignin-model substrates and on COD removal from effluent of an ECF kraft pulp mill. Journal of Hazardous Materials. 141: 273–279.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]

60. Xu G. and Goodell B. (2001). Mechanisms of wood degradation by brown-rot fungi: chelator-mediated cellulose degradation and binding of iron by cellulose. Journal of Biotechnology. 87: 43–57.

Siderophore and Its Applications in the Field of Bioenvironmental Researches

Fatemeh Shahryari [*1], Roghayeh Moradi [2]

1- Assistant Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
2- Ph.D. student, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

shahryari@znu.ac.ir

Abstract

Iron, one of the essential micronutrients, is needed for electron transport and metabolic processes in almost all living organisms. The ferric form (Fe^{3+}) of iron is insoluble in nature and inaccessible at physiological pH (7.35–7.40). Under iron-limited conditions, metal-chelating agents such as siderophores are synthesized by many bacteria and a few fungi. Siderophores have a high affinity for iron or other metals. In recent years, siderophores have been considered due to their potential applications in different aspects. Siderophores have applications in microbial ecology to enhance the growth of several unculturable microorganisms and can alter the microbial communities. In agriculture, siderophores are used as plant growth promoters by enhancing the Fe uptake by plants and as potential biocontrol agents against phytopathogens. Therefore, they are suitable alternatives for chemical pesticides. Also, siderophores can be applied in the bioremediation of heavy-metal- contaminated samples and as a biosensor. In this article, the different uses of these iron-chelating molecules are highlighted.

Keywords: Biocontrol, Bioremediation, Biosensor, Iron, Microbial Ecology.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1398.12.2.5.0]