

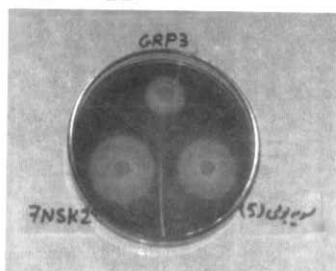


وزارت جهاد کشاورزی

مؤسسه تحقیقات خاک و آب

[www.swri.ir](http://www.swri.ir)

## باکتریهای تولیدکننده سیدروفور و امکان تامین آهن مورد نیاز گیاهان



میر حسن رسولی صدقیانی، کاظم خاوازی و محمد جعفر ملکوتی

دانشجوی دکتری خاکشناسی دانشگاه تربیت مدرس، عضو هیات علمی مؤسسه تحقیقات  
خاک و آب و استاد دانشگاه تربیت مدرس

نشریه فنی شماره ۴۲۷

(شورای عالی سیاستگذاری توسعه کاربرد مواد بیولوژیک و استفاده بهینه از کود و سم در کشاورزی)

بهار ۱۳۸۴

انتشارات سنا، تهران، ایران

بسمه تعالی

قید العلم بالکتابه

خوب نیست کسی روی یافته‌های علمی خود مثل مار چنبر بزند. امام علی (ع)

### ● پیش‌گفتار

خاک یکی از اجزای مهم منابع پایه است که بعنوان بستر اصلی کشت گیاه و نیز محیطی منحصر بفرد برای انواع حیات محسوب می‌شود. انسان اگر چه در مسیر تکاملی خود با دستیابی به فناوری های نوین، پیشرفت های سریع و شگفت انگیزی را به ارمغان آورده است ولی متأسفانه آثار سوء آن بتدریج با بروز اختلال و دگرگونی در شرایط تعادلی و متعارف منابع پایه، به ویژه خاک و آب همراه گردیده که موجب پدیدار شدن انواع ناهنجاریها، کاهش سطح حاصلخیزی خاکهای زراعی، افت تولید و بحران‌های زیست محیطی شده است. از این رو اکنون بیش از هر زمان دیگر، برگزیدن سیاستهای سازگار و راه‌حلهای منطقی برای عرضه مواد غذایی در پاسخگویی به تقاضای روزافزون جمعیت و در مسیری هماهنگ با ملاحظات زیست محیطی، احساس می‌شود. در این میان آنچه که بیش از هر عامل دیگر بویژه در سطح ملی می‌تواند در جهت تنویر افکار عمومی، افزایش آگاهی جامعه، شناخت مسایل و مشکلات زیست محیطی، نیروهای مردمی را در گام برداشتن در مسیر توسعه پایدار سهیم سازد، تهیه و تدوین نشریه‌ها و کتب علمی و فنی، آموزشی، تحقیقی، ترویجی و تحلیلی است که به عنوان وسیله ارتباطی مناسب برای بیان و اشاعه مبانی نظری و ارائه راهکارهای علمی و فنی در جهت افزایش آگاهی و دانش مخاطبان بشمار می‌آیند. از آنجایی که هدف اساسی موسسه تحقیقات خاک و آب، نخست شناخت توان تولیدی منابع خاک و آب و سپس بهره‌برداری و مدیریت مناسب این منابع در راستای تولید پایدار، امنیت غذایی و سلامت جامعه می‌باشد انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب بر آن است تا با انتشار آثار علمی، فنی و کاربردی مورد نیاز، گامی اساسی و بنیادی در راستای رسالت خویش بردارد و در این رهگذر پذیرای پیشنهادهای سازنده، انتقادهای مسئولانه و راهنماییهای ارزنده کلیه اندیشمندان، پژوهشگران و دست‌اندرکاران نیز خواهد بود. باشد که با این گام ضمن انجام مسئولیتی خطیر، همگان را در تلاش بی‌وقفه برای پاسداری از بستر هستی فراخوانیم. ان شاء الله.

انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب

● **مقدمه (اهمیت موضوع):** باکتریهای ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPR) از باکتریهای آزادزی خاک هستند. این باکتریها اغلب در نزدیکی یا حتی در داخل ریشه گیاهان یافت می شوند (رسولی و همکاران، ۱۳۸۲؛ اسدی رحمانی و همکاران، ۱۳۸۳). ریزوسفر معمولاً به لایه نازک یک الی سه میلی متری از خاک اطراف ریشه اطلاق می شود که موجودات زنده آن از نظر کمی و کیفی تحت تاثیر فعالیت های ریشه نظیر تنفس و ترشحات ریشه ای قرار دارند. PGPRها از طرق الف) تثبیت نیتروژن، ب) سنتز و تولید سیدروفورهای کمپلکس کننده آهن، ج) تولید هورمون های گیاهی نظیر اکسین ها و سیتوکینین ها، د) انحلال ترکیبات معدنی فسفات و ه) ایجاد رقابت با عوامل بیماریزای گیاهی بواسطه تولید آنتی بیوتیک ها و ترکیبات قارچ کش، رشد گیاهان را بهبود می بخشند. تحریک رشد گیاه توسط سویه های زیادی از باکتری های جنس *Clostridium*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Azotobacter* و *Azospirillum*, *Serratia*, *Hydrogenophaga*, *Enterobacter* و *Pseudomonas* گزارش شده است. از مهمترین باکتریهای PGPR جنس *Pseudomonas*ها هستند که تحت شرایط کمبود آهن، سیدروفور ترشح می نمایند (خاوازی و ملکوتی، ۱۳۸۰؛ رسولی و همکاران، ۱۳۸۴). همچنین از توپاکترها نیز بواسطه تولید متابولیت های محرک رشد گیاه از این گروه هستند (خسروی، ۱۳۷۶). تقریباً تمام باکتری های هوازی و

قارچ‌ها سیدروفور تولید می‌کنند، لیکن توانایی تولید در گونه‌ها و سویه‌های مختلف داخل هر گونه متفاوت می‌باشد.

باکتری‌های جنس سودوموناس، باکتری‌هایی هستند از خانواده Pseudomonadaceae که به شکل میله‌ای راست یا کمی خمیده، دارای تارک قطبی، بدون اسپور و گرم منفی می‌باشند. این باکتری‌ها، هوازی و از نظر منبع انرژی و کربن کموارگانوتروف (منبع انرژی و کربن از مواد آلی) هستند. باکتری‌های *Pseudomonas* و بالاخص سودوموناس‌های فلورسنت از مهمترین اعضای جامعه میکروارگانیسم‌های ریزوسفری می‌باشند که مطالعات بسیار زیادی درخصوص PGPR بودن آنها و اثرات مثبت ناشی از تلقیح آنها بر رشد گیاهان شده‌است. گونه‌های فلورسنت شامل *P. aeruginosa*, *P. putida*, *P. fluorescens* و *P. chloraphis* و همچنین پاتوژنهای گیاهی نظیر *P. syringae* و *P. cichorii* هستند.

مشخصه عمومی سودوموناس‌های فلورسنت تولید پیگمانهایی است که در برابر نور، فرابنفش (۲۵۴ نانومتر) به ویژه در شرایط کمبود آهن خاصیت فلورسانس دارند. به این پیگمان‌های با خاصیت فلورسانس و محلول در آب سیدروفور (siderophore) گفته می‌شود. سیدروفورها کلاتها یا ترکیبات آلی با وزن مولکولی پایین (کمتر از ۱۰۰۰ دالتون) و با میل ترکیبی شدید و اختصاصی برای کمپلکس شدن با آهن فریک ( $Fe^{3+}$ ) و سایر کاتیونها از جمله روی ( $Zn^{2+}$ ) هستند. این ترکیبات در شرایط

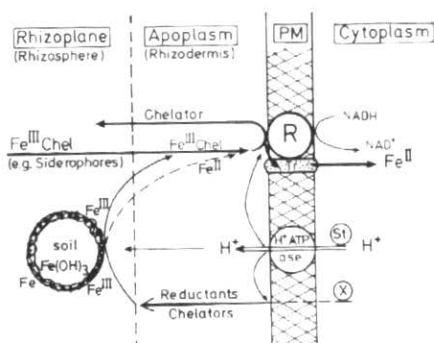
کمبود آهن ( $Fe^{3+} < 10 \mu M$ ) و به منظور مقابله با آن ترشح و کمپلکس پایداری ( $K_f = 10^{30}$ ) با آهن (III) نامحلول تشکیل داده و آنرا را بصورت ترکیب متحرک و قابل دسترس درمی آورند و از این طریق بطور موثری آن را به داخل سلولها منتقل می نمایند. سیدروفورهای باکتریایی در چهار دسته تقسیم بندی شده اند. دسته اول شامل سیدروفورهای فنل-کاتکولی (Phenol-Catecholates) هستند که از آن جمله می توان به انتروباکتین (Enterobactin)، آگروباکتین (Agrobactin)، پیوکلین (Pyochelin) و مایکوباکتین (Mycobactin) اشاره نمود. هیدروکساماتها (Hydroxamates) دسته دیگری از سیدروفورها را تشکیل می دهند. آئروباکتین (Aerobactin)، شیزوکین (Schizokinen) که توسط باسیلوس مگاتریوم و سیانوباکتر جنس آنابنا تولید می شود و همچنین فری اکسامین های حلقه ای (نوع E و D2) و خطی (A, B, D1, G1 و G2) از این دسته هستند. فری اکسامین ها عمدتاً توسط اکتینومیست ها ترشح می شوند. گروه بعدی سیدروفورهای نوع کربوکسیلات (Carboxylate) هستند که مشخص ترین نمونه آن ریزوباکتین (Rhizobactin) است و توسط باکتری ریزوبیوم میلیوتی تولید می شود. دسته چهارم سیدروفورهای باکتریایی، پیووردین ها (Pyoverdine) هستند. این سیدروفورها، کروموپتیدهای محلول در آب و برنگ سبز-زرد هستند و توسط سودوموناس های فلورسنت تولید می شوند و به دلیل رنگ روشن و خاصیت پرتوافشانی، این خصوصیت فنوتیپی به سهولت با

استفاده از محیط KingB قابل تشخیص است. نزدیک به ۷۰ نوع پیوریدین با ساختمان مختلف شناسایی شده است. سودوباکتین (Pseudobactin) از سیدروفورهای نوع پیوریدین بوده و توسط *Pseudomonas B10* تولید می شود. غلظت سیدروفورهای باکتریایی در خاک بین ۴ تا ۳۰۰ میکرومول و غلظت انواع قارچی بین ۳۰ تا ۲۴۰ میکرومول در گرم خاک گزارش شده است. توانایی بسیار بالای تولید سیدروفور، توسط سویه های مختلفی از سودوموناس ها گزارش شده است (Yu و Crowley، ۱۹۹۱؛ رسولی و همکاران، ۱۳۸۴). سودوموناسها بواسطه تولید سیدروفورها و ایجاد رقابت برای سوبستراهای مختلف بویژه آهن، اثر بازدارندگی قابل ملاحظه ای علیه عوامل بیماریزای قارچی نظیر پاخوره غلات و مرگ پتیومی دارند.

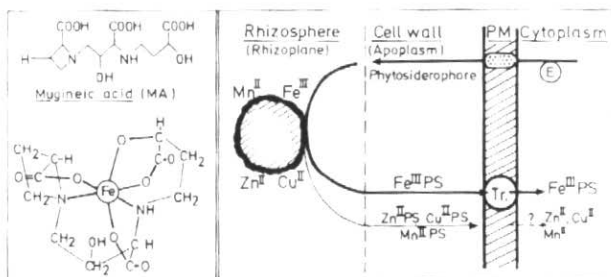
• استراتژی های جذب آهن در گیاهان: طبق مطالعات کلاسیک Marschner و Romheld (۱۹۹۴)، گیاهان از نظر تغذیه آهن و مکانیسم های پاسخ به کمبود آن در دو استراتژی تقسیم بندی می شوند. در استراتژی I، گیاهان دولپه ای و تک لپه ایهای غیرگرامینه با القا سیستم آنزیمی احیاکننده در سطح سلولهای ریشه، ترشح  $H^+$  و ترکیبات احیاکننده وکلات کننده به کمبود آهن پاسخ می دهند (شکل ۱). گیاهان علفی تک لپه ای (غلات) با تولید فیتوسیدروفورها (PS) به شرایط کمبود آهن و روی عکس العمل نشان می دهند که این نحوه پاسخ به استراتژی II معروف است. فیتوسیدروفورها یکسری اسیدهای آمینه غیرپروتئینی از خانواده

## باکتریهای تولیدکننده سیدروفور و امکان تامین آهن مورد

اسید موژینیک (Mugineic acid) هستند که مانند سیدروفورهای میکروبی تمایل شدیدی به کمپلکس شدن با آهن و روی دارند. این ترکیبات کلات کننده  $Fe^{3+}$ ، در ریزوسفر ترشح شده و توسط یک سیستم جذب اختصاصی در سطح ریشه به داخل منتقل می شوند (شکل ۲).



شکل ۱- مدل جذب آهن در دو لپه‌ای‌ها و تک‌لپه‌ای‌های غیر گرامینه (استراتژی I).



شکل ۲- مدل جذب آهن در گونه‌های گرامینه (استراتژی II).

از آنجا که PSها نسبت به سیدروفورهای میکروبی در مقادیر بالایی تولید می‌شوند، مقدار آهن بیشتری نیز برای گیاهان فراهم می‌کنند. برخی از گیاهان آهن-کارا (Fe-efficient) مربوط به هر دو استراتژی فوق، می‌توانند از سیدروفورها برای تامین آهن مورد نیاز خود بهره گیرند، بطوریکه حتی از این توانایی استفاده از سیدروفورها، بعنوان استراتژی III یاد شده است (Crowley و Yu، ۱۹۹۱؛ Marschner و Romheld، ۱۹۹۴). جذب کمپلکس سیدروفور - آهن توسط باکتری‌ها نیز به حضور گیرنده‌های پروتئینی خاص در سطح غشای بیرونی آنها بستگی دارد و امکان جذب سیدروفورهای خود باکتری و حتی سایر باکتری‌ها بعنوان توان رقابتی در شرایط محدودیت آهن به حساب می‌آید.

• آهن و تحرک آن در خاک: علی‌رغم فراوانی آهن و همچنین روی در خاک، کمبود آنها یک پدیده رایج در گیاهان موجود در خاک‌های آهنی می‌باشد. در شرایط فوق، حلالیت آهن و روی در محلول خاک پایین است. غلظت بحرانی آهن جهت رشد گیاه در حدود  $10^{-8}$  مولار می‌باشد که عموماً ۱۰۰ برابر از مجموع هیدرولیز گونه‌های معدنی  $Fe^{3+}$  که در خاک‌های هوادهی شده انتظار می‌رود، بالاتر است. توانایی گیاهان در غلبه بر این شکاف تا حدودی بواسطه حضور لیگاندهای آلی با قدرت کمپلکس‌کنندگی متفاوت توجیه می‌گردد. این لیگاندها حلالیت اکسیدهای آهن و غلظت آنها را در محلول خاک افزایش می‌دهند. یکی از عوامل مهم در کمپلکس‌شدن و تحرک آهن در خاک‌ها، سیدروفورها هستند. نتایج

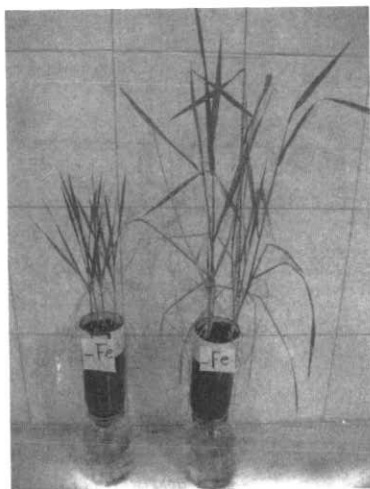


---

## باکتریهای تولیدکننده سیدروفور و امکان تامین آهن مورد ۸/

---

تحقیقات در مورد انتقال آهن بواسطه سیدروفورها نشان داده که از نظر میزان نیاز به آهن در گیاهان و میکروبها مشابهت وجود دارد و چنین استنباط می شود که میکروارگانیسم های اشغال کننده ریزوسفر ممکن است آهن مورد نیاز گیاهان را تامین نمایند.



شکل ۳- تأثیر تلقیح سودوموناس های فلورسنت بر رشد رویشی گندم «راست» در مقایسه با حالت استریل «چپ» در شرایط محدودیت آهن (رسولی و همکاران، ۱۳۸۴)

بنابراین گیاهانی که قادر به استفاده از سیدروفورهای میکروبی بعنوان حامل آهن III هستند، به اتکای توانایی اشان در استفاده از منابع متعدد آهن در شرایط مختلف خاک، کارائی بالایی نسبت به آهن نشان می دهند. بهر حال، بواسطه حضور سیدروفورها، قابلیت استفاده و تحرک آهن در

محیط ریشه افزایش یافته و کمپلکس سیدروفور - آهن تشکیل شده می تواند در محلول خاک همراه با جریان توده ای به سطح ریشه برسد و آهن از طریق مکانیسم عمل آنزیم احیاکننده کلات آهن III موجود در غشای پلاسمایی (گیاهان استراتژی I) و یا از طریق فرایند تبادل لیگاندی با فیتوسیدروفورها (گیاهان استراتژی II) جذب شود. تحقیقات چنین نشان داده که در خاک های غنی از ریزمغذی ها، در منطقه ریزوسفر که ترشحات ریشه ای و مواد آلی فراوان است، غلظت سیدروفورهای هیدروکساماتی بالا است (Yehuda و همکاران، ۱۹۹۶).

• جذب ترکیبات سیدروفوری توسط گیاه: استفاده از پتانسیل ژنتیکی گیاهان و تنوع بیولوژیکی خاک به عنوان یکی از اصول کشاورزی پایدار در راستای حفاظت از محیط زیست تلقی می شود. گیاهان زراعی به منظور تولید مطلوب، بایستی عناصر غذایی را به نحو موثری جذب و توزیع نمایند. نتایج متعددی در مورد تأثیر و کارایی ترکیبات سیدروفوری آهن به عنوان منبع آهن برای گیاهان گزارش شده است. تجمع و استفاده از ترکیبات سیدروفوری آهن در منطقه ای با فعالیت شدید میکروبی از جمله در نزدیکی ریشه گیاهان گزارش شده است. مهم ترین مکانیسم فراهمی آهن برای گیاهان، براساس میزان احیاء کلات های آهن پایه گذاری شده است. طبق تحقیقات انجام شده پتانسیل رادکس غشای پلاسمایی گیاهان کلروزه معادل ۳۷۰- میلی ولت برآورد گردیده در حالیکه در مورد فری اکسامین ب (FOB) این پتانسیل ۴۷۰- می باشد. برعکس، Fe-EDDHA

پتانسیل رادکسی معادل ۲۳۰- میلی ولت داشته و بدان سبب میزان جذب آن توسط گیاهان بالا است، چه پتانسیل رداکس آن بزرگتر از پتانسیل غشا است. عامل محدودکننده دیگر تمایل کلات به ترکیب شدن با  $Fe^{2+}$  بعد از احیاء  $Fe^{3+}$  می باشد. علی رغم این محدودیت های پتانسیل رداکس در جذب آهن بواسطه FOB، مطالعات بلندمدت، نشان از توانایی گیاهان مختلف در استفاده از این سیدروفور به عنوان منبع آهن داشته است. با اینحال برای رفع کامل کلروز آهن در حدود غلظتی معادل ۱۰ برابر بیشتر از  $Fe-EDDHA$  مورد نیاز است. گیاهان، آهن را مستقیماً از محلول خاک جذب نمی نمایند، بلکه مراحل جذب بطور متناوب در ریزوسفر و در حضور میکروارگانیسم، اتفاق می افتد (Siebner-Freibach و Yu، ۲۰۰۳).

• مکانیسم های جذب کمپلکس سیدروفور-آهن: بر اساس مطالعات انجام شده مقدار بیشتر سیدروفور FOB و سایر سیدروفورهای مشابه آن در خاک به سطوح رس ها می چسبند و امکان جذب آهن را برای گیاهان مهیا می نمایند. در گیاهان کاشته شده در خاک در مقایسه با گیاهان هیدروپونیک، اثر فعالیت میکروبی در افزایش غلظت آهن آپوپلاست و سطوح ریشه بسیار مشهود است. سیدروفورهایی که در خاک جذب سطحی سطوح رس ها شده اند، توسط مکانیسم تبادل کاتیونی در محلول خاک، مکانیسم عمل احیاءکننده های آزاد شده در محلول خاک و مکانیسم ناقل (Shuttle) یا انتقال توسط اسیدهای آلی، فیتوسیدروفورها و یا حتی سایر سیدروفورهای میکروبی، آهن مورد نیاز گیاه را تأمین می نمایند.

غلظت اسیدهای آلی در ریزوسفر می تواند به ۵۰ تا ۹۰۰۰ میکرومول برسد. این ترکیبات در انتقال آهن از سطوح تبادلی به ریشه گیاهان نقش دارند. کارآیی این مکانیسم به هنگام اسیدی شدن ریزوسفر افزایش می یابد. از طرف دیگر ترشح سیتрат و مالات در شرایط کمبود آهن تشدید می یابند. اخیراً نشان داده شده ترکیبات حاصل از تجزیه جزئی محصولات سیدروفوری و متابولیت های ناشی از فعالیت میکروب ها به عنوان منبع کارآمد آهن برای گیاهان عمل می کنند.

• جذب کمپلکس سیدروفور-آهن توسط پدیده های تبادل لیگاندی و مکانیسم ناقل: انتقال آهن از یک لیگاند به لیگاند دیگر به ثابت های پایداری دو لیگاند وابسته است، لیکن سایر عوامل نیز در تأثیر این مکانیسم برای تأمین آهن به گیاهان دخیل هستند: الف) غلظت مطلق و نسبی کلات ها، آهن و یون های محلول خاک، ب) pH محلول، ج) سنتیک یا سرعت واکنش های کمپلکس شدن آهن. هرگونه تغییر در یکی از این عوامل باعث تغییر در تعادل شیمیایی خواهد گردید. به عنوان مثال حضور غلظت بالایی از کلات ضعیف مثل دی هیدروکسامات می تواند پدیده تبادل لیگاندی با کلات قوی نظیر FOB و حتی لیگاند خیلی ضعیف مانند اسید آلی را عملی سازد.

در محیط های طبیعی، حضور ترکیب های متحرک که به عنوان ناقل آهن از فاز جامد به ریشه گیاه عمل می نمایند، حائز اهمیت بوده و توانایی گیاه در کسب آهن از این ناقل ها یک عامل تعیین کننده است.

ارزیابی عوامل مؤثر در تبادل لیگاندی آهن سیدروفوری نشان داده که اسید سیتریک کمپلکس کننده ضعیف آهن در محلول های بافر شده با  $\text{CaCO}_3$  بوده و در غلظت های بالایی در ریزوسفر موجود است. اسید سیتریک به راحتی توسط گیاه جذب و انتقال می گردد. لیکن نظر به اینکه پیوند ضعیفی با آهن ایجاد می کند، به عنوان ناقل آهن در خاک از اهمیت کمی برخوردار است. ترکیب EDDHA از نظر انتقال آهن از منابع سیدروفوری در مسیرهای طولانی به عنوان بهترین ناقل عمل می کند، این کارایی EDDHA با توجه به ثابت پایداری و تمایل آن به کمپلکس نمودن آهن، در مقایسه با سیدروفورها قابل توجیه است. بعلاوه پتانسیل رد اکس نسبتاً بالای آن، مکانیسم نسبتاً کارایی را مهیا می نماید. تبادل لیگاندی عمدتاً به گیاهان استراتژی II نسبت داده شده بود که اخیراً وجود این مکانیسم در گیاهان استراتژی I نیز به اثبات رسیده است.

سیدروفور جذب سطحی شده (آهن سیدروفوری) همانند یک کود کندها عمل کرده و مزایای یک منبع آهن را دارد. این منبع همانند Fe-EDDHA از منطقه ریزوسفر آبشویی نشده و برای استفاده مداوم گیاه به شکل قابل استفاده باقی می ماند. فراهمی آهن از این مخزن، عمدتاً به تامین لیگاند کافی بستگی داشته که می تواند از یک طرف آهن را از سیدروفور گرفته و از طرف دیگر آن را به شکل قابل استفاده گیاهی (بویژه در خاک های آهکی) در اختیار ریشه قرار دهد. به نظر می رسد در خاک به ویژه ترکیبات بیوشیمیایی موجود در ریزوسفر می توانند به اندازه کلات

EDDHA در پیشبرد مکانیسم ناقل نقش داشته باشند. نمونه بارز این ترکیبات، ریزوفرین (Rhizoferrin) بوده که به عنوان حامل قوی آهن به گیاهان عمل می‌نماید. همچنین این سیدروفور دارای بار منفی بوده که آن را به شکل متحرک در خاک نگه داشته و آهن آن برای گیاهان قابلیت استفاده بالایی دارد. بنابراین تبادل لیگاندی حتی زمانی که ثابت پایداری ناقل پایین است، می‌تواند اتفاق افتد. مجموع ترکیباتی که از سطوح رس‌ها آزاد می‌شوند، همراه با غلظت‌های بالای ترشح پروتون‌ها و اسیدهای آلی از ریشه می‌توانند در میکروسایت‌های ریزوسفری موثر باشند (Siebner-Freibach و همکاران، ۲۰۰۳).

در تحقیقی در سال ۱۳۸۲ توسط رسولی صدقیانی و همکاران، ۵۲ نمونه خاک ریزوسفری (خاک به همراه بوته‌های گندم) از غالب نقاط گندم‌خیز کشور تهیه گردید. از این نمونه‌ها، ۲۰۱ ایزوله منتسب به جنس سودوموناس‌های فلورسنت جداسازی گردید. گروه‌بندی این ایزوله‌ها با استفاده از الکتروفورز پروتئین‌های محلول انجام و ایزوله‌ها در ۲۲ گروه متنوع قرار گرفتند. نتایج تست‌های بیوشیمیایی نشان داد که از این ایزوله‌ها ۵۳ درصد گونه *P. fluorescence*، ۴۴ درصد گونه *P. putida* و ۳ درصد *P. aeruginosa* بودند. میزان تولید سیدروفورها توسط این ایزوله‌ها با روش CAS-Agar ارزیابی و نشان داده شد که تمامی این ایزوله‌ها توانایی تولید سیدروفور را داشتند، لیکن میزان تولید سیدروفور در این ایزوله‌ها متفاوت بود. هاله نارنجی رنگ (سیدروفور) در ۲۵ درصد

ایزوله‌ها کمتر از ۱۵ میلی‌متر در روز، در ۶۱ درصد ایزوله‌ها بین ۲۰-۱۵ میلی‌متر در روز و در ۱۴ درصد ایزوله‌ها بیش از ۲۰ میلی‌متر در روز بود. در مقایسه با سویه‌های خارجی 7NSK2 و GPR3 که به طور وسیعی به عنوان PGPR و همچنین بیوکنترل (کنترل کننده بیولوژیکی) بیماریهای قارچی بکار می‌روند، برخی از سویه‌های بومی توانایی بیشتری از نظر تولید سیدروفور و اکسین نشان دادند. میزان ترشح اکسین (به عنوان یک صفت PGPR) در برخی از گونه‌ها به بالاتر از ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نیز رسید. گونه *P. putida* از نظر تولید اکسین کارایی بیشتری نسبت به دو گونه دیگر داشت. همچنین تعدادی از سویه‌های جدا شده توانایی انحلال فسفات‌های معدنی نامحلول را نیز داشتند.

### ● جمع‌بندی و پیشنهادها (چه باید کرد؟)

۱- سیدروفورها مولکولهای آلی با وزن مولکولی کمتر از ۱۰۰۰ دالتون می‌باشند که میل ترکیبی شدیدی با آهن دارند (یک سری کلات‌کننده‌های  $Fe^{3+}$  هستند) که در شرایط کمبود آهن توسط میکروارگانیسم‌های خاک به ویژه در شرایط فراهمی مواد آلی توسط باکتریهای پسودوموناس ترشح می‌شوند. این کلاتها تحرک و جابه جایی آهن نامحلول ( $Fe^{3+}$ ) و همچنین تا حدود  $Zn^{2+}$  را افزایش می‌دهند. به عبارت دیگر از طریق تشکیل کمپلکس پایدار با آنها می‌توانند در تغذیه گیاه موثر باشند.

سودوموناس‌های فلورسنت از عمده‌ترین تولیدکننده‌های سیدروفور هستند. فیتوسیدروفورها در واقع سیدروفورهای گیاهی هستند که در شرایط کمبود آهن و روی از ریشه گیاهان گرامینه ترشح می‌شوند (استراتژی II) و با تشکیل ترکیب پایدار  $Fe^{3+}$  و  $Zn^{2+}$  در جذب آنها تاثیر به سزایی دارند. این ماده مهم توسط ریزوبیومها نیز تولید می‌شود که بدان ریزوباکتین نامیده می‌شود.

۲- به رغم فراوانی آهن (Fe) و همچنین روی (Zn) در خاکها، کمبود آنها در بیشتر محصولات زراعی و باغی به ویژه در خاکهای آهکی مشاهده می‌شود. آهن از جمله عناصر غذایی است که حتماً بایستی به صورت کمپلکس و به واسطه کلاتها جذب شود و جذب مستقیم آن از محلول خاک به ندرت اتفاق می‌افتد. سیدروفورهای میکروبی و گیاهی (فیتوسیدروفورها) و همچنین اسیدهای آلی مترشحه از ریشه از مهمترین کلات‌کننده‌های آهن فریک و روی هستند. بنابراین با استفاده از پتانسیل ژنتیکی گیاهان (انتخاب ارقام کارای گیاهی در ترشح فیتوسیدروفورها و اسیدهای آلی) و پتانسیل بیولوژیک خاک (انتخاب سویه‌های موثر تولیدکننده سیدروفور)، می‌توان بر این مشکل غلبه نمود.

۳- خوشبختانه در مورد گندم، ارقام کارا در تولید فیتوسیدروفورها شناسایی شده و از ریزوسفر مزارع مختلف گندم کشور نیز سویه‌های موثر سودوموناس‌های فلورسنت تولیدکننده سیدروفور جداسازی گردیده و در



بانک میکروبی موسسه تحقیقات خاک و آب موجود می باشد (رسولی و همکاران، ۱۳۸۴).

۴- به نظر می رسد بایستی در مورد سایر محصولات استراتژیک نیز ارقام کارا تعیین گردند. به هر حال استفاده از مایه تلقیح PGPR مرکب از سودوموناس تولید کننده سیدروفور و اکسین، دورنمای روشنی را در افزایش تولید محصولات کشاورزی نوید می دهد.

● **سپاسگزاری:** بدینوسیله از همکاران محترم به ویژه سرکار خانمها رحمانی، اسدزاده، سعدی و آقایان مهندس رضایی فر و محمودنیا برای تایپ، تنظیم و ویراستاری ادبی و تهیه تصاویر نشریه و همچنین کلیه همکاران بخش خدمات فنی و تحقیقاتی مؤسسه و انتشارات سنا تشکر و قدردانی می نماید.

### ● منابع

۱. اسدی رحمانی، ه. ه. خسروی، ز. علیپور، م. ج. ملکوتی. ۱۳۸۳. نقش باکتریهای محرک رشد (PGPR) در رشد و سلامت گیاه، قسمت اول: افزایش عملکرد گیاه. نشریه شماره ۳۰۹. انتشارات سنا، تهران، ایران.
۲. خاوازی، ک. و م. ج. ملکوتی. ۱۳۸۰. ضرورت تولید صنعتی کودهای بیولوژیک در کشور (مجموعه مقالات). نشر آموزش کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ایران.

خسروی، ه. ۱۳۷۶. بررسی فراوانی و انتشار ازتوباکتر کروکوکوم در خاکهای زراعی استان تهران و مطالعه برخی از خصوصیات فیزیولوژیک آن. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۵. رسولی، م. ح. ک. خوازی و م. ج. ملکوتی. ۱۳۸۲. نقش تغذیه بهینه کود در ترشح سیدروفورها به منظور بهبود جذب عناصر ریزمغذی، نشریه فنی شماره ۳۰۷، دفتر برنامه‌ریزی رسانه‌های ترویجی، تهران، ایران.

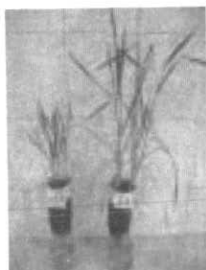
۵. رسولی صدقیانی، م. ح. ح. رحیمیان ک. خوازی، م. ج. ملکوتی و ه. اسدی رحمانی. ۱۳۸۴. بررسی تراکم جمعیت، جداسازی و شناسایی سودوموناس‌های فلورسنت از ریزوسفر گندم مناطق مختلف ایران، مجله علمی پژوهشی خاک و آب. شماره ۱۹. موسسه تحقیقات خاک و آب، تهران ایران. (زیر چاپ).

6. Crowley, D. E., Y. C. Wang, C. P. P. Reid, and P. J. Szaniszlo. 1991. Mechanisms of iron acquisition from siderophores by microorganisms and plants. *Plant and Soil*, 130: 179-198.
7. Marschner, H., and V. Romheld. 1994. Strategies of plants for acquisition of iron. *Plant and Soil*, 165: 261-274.
8. Siebner-Freibach, H., Y. Hader, Y. Chen. 2003. Siderophores sorbed on Ca-montmorillonite as an iron source for plants. *Plant and Soil*, 251: 115-124.
9. Yehuda, Z., M. Shenker, V. Romheld, H. Marschner, Y. Hadar, and Y. Chen. 1996. The role of ligand exchange in the uptake of iron from microbial siderophores by gramineous plants. *Plant Physiol.*, 112: 1273-128.



**Ministry of Jihad-e-Agriculture**  
Agricultural Research, Education and Extension Organization  
Soil and Water Research Institute  
E-mail: [www.swri.ir](http://www.swri.ir)

***Introducing Sidrophore Producing Bacteria with  
the Potential for Supplying Plant's Iron and Zinc***



**M. H. Rasouli, K. Khavazi, and M. J. Malakouti**

Ph.D. Student, Tarbiat Modarres University, Scientific Member, Soil and Water Research Institute and  
Professor, Tarbiat Modarres University

**Publication No. 427**

High Council of Policy Making on the Development of Biological Products Application,  
Optimum Utilization of Chemical Fertilizers and Pesticides in Agriculture

**2005**

**Sana Publication, Tehran, Iran**