

ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه و نقش آن‌ها در پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

محمد رضا نادری^{*۱}

mr.naderi.2012@stu-mail.um.ac.ir

رضوان نادری^۲

چکیده

استفاده از ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه به منظور پالایش زیستی و یا بهبود کارایی سایر روش‌های زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، دستاوردهای شگرفی از قبیل سازگاری با محیط زیست، هزینه اندک در مقایسه با روش‌های فیزیکی و شیمیایی پالایش خاک‌های آلوده به فلز، بهبود حاصل‌خیزی خاک، افزایش تنوع زیستی و غیره را به دنبال دارد. این ریزوباکتری‌ها به دلیل متحمل بودن نسبت به فلزات سنگین قادر به جذب سطحی یا درونی آلاینده‌های فلزی و همچنین احیای فلزات به فرم‌های با سمیت کم‌تر می‌باشند و بدین طریق موجب زدایش یا تثبیت آن‌ها می‌شوند. علاوه بر این، ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق مکانیسم‌های مختلفی نظیر تثبیت نیتروژن اتمسفر، انحلال فسفات، ترشح سیدروفورهای کلات‌کننده آهن، تولید هورمون‌های محرک رشد مانند اکسین و جیبرلین و جلوگیری از سنتز بیش از حد اتیلن به واسطه‌ی تولید آنزیم ACC-دی‌آمیناز می‌توانند رشد گیاه را در خاک‌های آلوده به فلز بهبود بخشند و بدین ترتیب سبب افزایش کارایی فرآیند گیاه‌پالایی می‌شوند. بر این اساس، در مطالعه‌ی حاضر مروری کوتاه بر نقش ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه در پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و همچنین تأثیر آن‌ها در بهبود کارایی گیاه‌پالایی آلاینده‌های فلزی خواهیم داشت.

کلمات کلیدی: ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، فلزات سنگین، زیست‌پالایی، گیاه‌پالایی.

۱- دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد* (مسئول مکاتبات).

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و تکنولوژی بذر، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

مقدمه

زدایش، جابه‌جایی و یا تثبیت آلاینده‌های فلزی موجود در خاک می‌باشد، با این وجود زمان‌بر بودن این تکنیک یکی از معایب اصلی آن محسوب می‌شود (۵). بر این اساس، کارآیی تکنیک گیاه‌پالایی تحت تأثیر فعالیت میکروب‌های ریزوسفری، گونه‌ی فلز و غلظت عناصر فلزی موجود در خاک قرار می‌گیرد (۶). ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق مکانیسم‌های مختلفی نظیر بهبود رشد گیاه و افزایش زیست‌فراهمی فلزات قادر به افزایش کارآیی گیاه‌پالایی آلاینده‌های فلزی می‌باشند. به عنوان مثال، استفاده از ریزوباکتری‌های سودوموناس آسینتوباکتر که از قابلیت ارتقای رشد گیاه برخوردار هستند سبب بهبود توان گیاه‌پالایی گونه‌ی غیربیش‌اندوز ذرت (*Zea mays* L.) از طریق افزایش رشد و بیوماس آن گردید (۷).

۱- زیست‌پالایی: روشی طبیعی به منظور احیای خاک‌های آلوده

روش‌های مرسوم مورد استفاده جهت زدایش فلزات سنگین از مکان‌های آلوده در شکل ۱ به نمایش در آمده‌اند. این روش‌ها شامل ۱- پرکردن زمین؛ حفاری، انتقال و ریختن خاک آلوده در مکانی که جهت دفع ضایعات خطرناک مجاز می‌باشد، ۲- تثبیت؛ فرآوری شیمیایی خاک به منظور غیرمحرک کردن فلزات، که معمولاً به دنبال آن سطح خاک جهت جلوگیری از نفوذ آلاینده‌های فلزی به اعماق خاک، تیمار می‌شود.

۳- آیشویی؛ استفاده از محلول‌های اسیدی به عنوان عوامل اختصاصی آیشویی جهت دگرگون کردن و شستن فلزات از خاک و به دنبال آن، برگرداندن بقایای پالایش شده‌ی خاک به مکان اولیه می‌باشند (۸). کاربرد این فرآیندها گاهی به دلیل بروز موانع تکنیکی و اقتصادی با محدودیت مواجه می‌شود. از این رو، یافتن روش‌های جایگزینی که بتوانند خاک‌های آلوده به

ریزجاندارانی که از لحاظ کشاورزی دارای اهمیت هستند، مکانیسم‌های ویژه‌ای را به منظور تحمل جذب یون‌های فلزی و کاستن از شدت تنش فلزات سنگین توسعه داده‌اند. این مکانیسم‌ها شامل ۱- پمپ کردن یون‌های فلزی به فضای خارج از سلول، ۲- تجمع و انباشت نمودن یون‌های فلزی در داخل سلول، ۳- تبدیل فلزات سمی به فرم‌های با سمیت کم‌تر و ۴- جذب یا واجذب فلزات می‌باشند (۱). ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه به دلیل برخورداری از این ویژگی‌ها هنگامی که با بذر تلقیح شده، یا در خاک بکار رفته‌اند، سبب کاهش‌قابل توجه سمیت فلزات و در عین حال بهبود همه جانبه‌ی رشد و عملکرد گیاهان زراعی نظیر نخود (*Cicer arietinum*)، ماش (*Vigna radiata*) و نخودفرنگی (*Pisum sativum*) گردیده‌اند (۱).

مشخص شده است که ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه علاوه بر نقشی که در حفاظت از گیاهان در مقابل سمیت فلزات سنگین بر عهده دارند، در بهبود حاصل‌خیزی خاک و افزایش بازدهی گیاهان زراعی از طریق فراهم آوردن عناصر غذایی مورد نیاز آن‌ها و سنتز مواد تنظیم‌کننده‌ی رشد نیز دارای نقش می‌باشند (۲). ریزوباکتری‌های محرک رشد به واسطه‌ی سنتز آنزیم ۱-آمینوسیکلوپروپان-۱-کربوکسیلات (ACC) - دی‌آمیناز قادرند از شدت تنش‌ی که توسط سطوح بالای اتیلن درون‌زاد بر گیاه تحمیل می‌شود، بکاهند و بدین طریق سبب ارتقای رشد گیاهان تحت تنش می‌شوند (۳). این میکروب‌های سودمند به دلیل برخورداری از صفات چندگانه‌ای نظیر مقاومت نسبت به فلزات و تبدیل آن‌ها به فرم‌های با سمیت کم‌تر و همچنین توانایی ارتقای رشد گیاهان از طریق مکانیسم‌های مختلف، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها جهت استفاده در مطالعات مربوط به زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین می‌باشند (۴).

گیاه‌پالایی یک از مهم‌ترین روش‌های زیستی مورد استفاده جهت پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است. این فناوری مستلزم استفاده از گیاهان انباشتگر فلزات به منظور

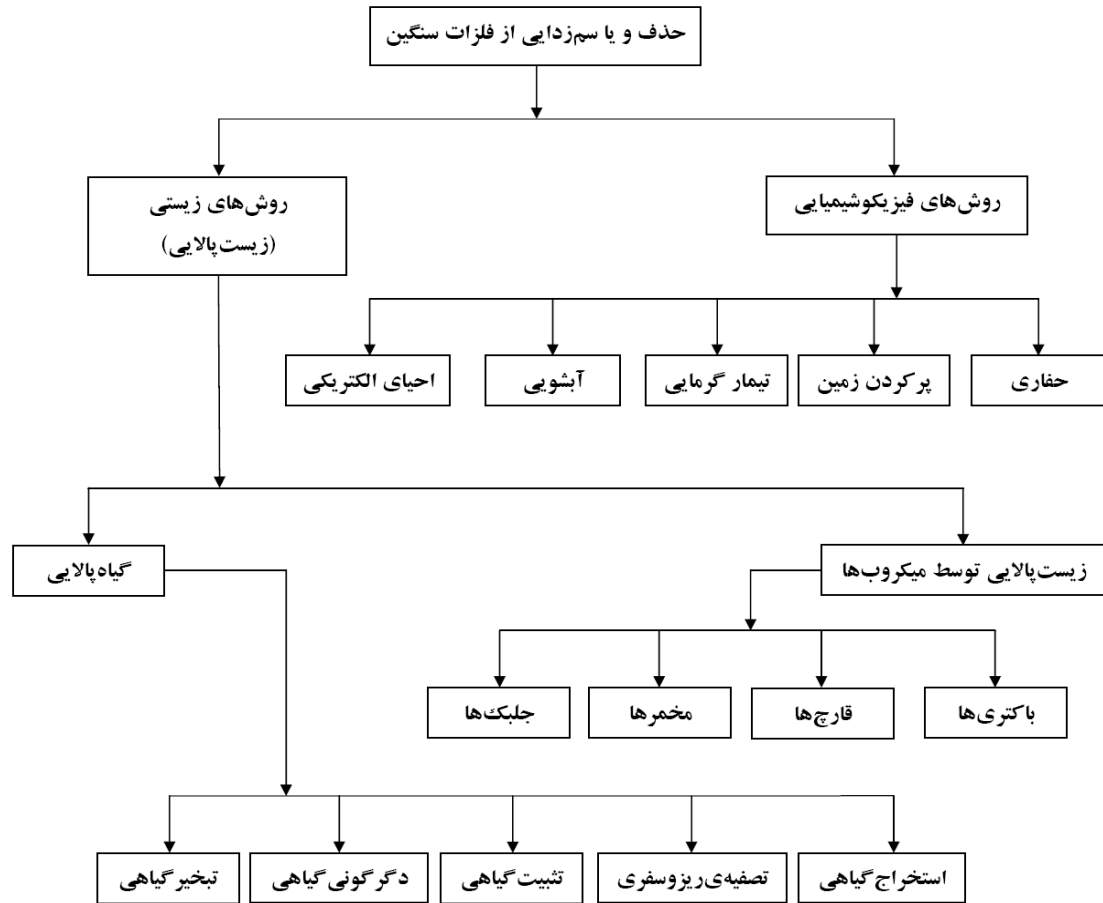
۱- Bioremediation

۲- Land filling

۳- Fixation

۴- leaching

فلزات سنگین را به شیوه‌ای کم‌هزینه، آسان، ایمن و دوستدار محیط زیست پاکسازی کنند، مورد نیاز است (۴).



شکل ۱- روش‌های مورد استفاده به منظور زدایش فلزات سنگین از خاک‌های آلوده

تلقیح محتوی ترکیبی از ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه و ریزجانداران همزیست تثبیت‌کننده‌ی نیتروژن به عنوان کلون‌کنندگان متحد و کودهای بیولوژیک، می‌تواند مزایایی را که جهت احیای اراضی آلوده ضروری هستند، فراهم آورد (۱۰). ممکن است که این ریزجانداران، بومی یک ناحیه‌ی آلوده باشند (زیست‌پالایی درون‌خیز^۱) و یا اینکه می‌توانند از مکان دیگری جداسازی شده و سپس به درون منطقه‌ی آلوده معرفی شوند (تقویت‌زیستی^۲). کارایی زیست‌پالایی وابسته به کارکرد ریزجانداران موجود در ناحیه‌ی ریزوسفر و شرایط محیطی

زیست‌پالایی یکی از این روش‌های جایگزین است که به صورت عمل میکروب‌ها یا سایر سیستم‌های زیستی در تجزیه یا دگرگون کردن آلاینده‌های محیط‌زیستی تحت شرایط کنترل شده تا یک سطح بی‌خطر و یا سطوح پایین‌تر از غلظت‌های مقرر شده توسط مراجع قانون‌گذاری تعریف می‌شود (۹). امکان استفاده از فناوری زیست‌پالایی به صورت در جا و بدون جابه‌جایی و انتقال خاک آلوده و بدون برهم زدن ماتریکس خاک وجود دارد و یا می‌توان از این فناوری به صورت خارج از محل و به واسطه‌ی جابه‌جایی و انتقال خاک آلوده از مکان اولیه به مکانی دیگر بهره جست. بنابراین، مدیریت جوامع میکروبی موجود در ناحیه‌ی ریزوسفر از طریق کاربرد مایه‌ی

۱- Intrinsic bioremediation

۲- Bioaugmentation

۲- پالایش تسهیل شده فلزات سنگین توسط

ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه

خاک ریزوسفری به دلیل زیاد بودن عناصر غذایی مترشح از ریشه‌ها، در مقایسه با خاک غیرریزوسفری تعداد بیشتری از گونه‌های باکتریایی را به سمت خود جذب می‌کند (۱۱). این باکتری‌ها و از آن جمله ریزوباکتری‌های محرک رشد موجب تسهیل رشد گیاه می‌شوند و از طرف دیگر، ثابت شده است که این سیستم گیاه-باکتری در به حداقل رساندن فراهمی زیستی و سمیت زیستی فلزات سنگین مؤثرتر می‌باشد (۱). اگرچه ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه عمدتاً به عنوان عوامل ارتقادهنده‌ی رشد در عملیات‌های زراعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، با این وجود تأکید قابل توجهی بر این باکتری‌های سودمند به منظور بهره‌برداری از پتانسیل زیست‌پالایی آن‌ها در حال شکل‌گیری است (۴).

زدايش فلزات سنگین از خاک‌های آلوده توسط ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق وارد کردن جمعیتی زیستا از باکتری‌های غیربومی به مکان آلوده (تقویت‌زیستی)، تحریک جمعیت‌های زیستای باکتری‌های بومی منطقه (تحریک‌زیستی^۱)، دگرگونی‌زیستی^۲، احیای‌زیستی^۳، انباشت‌زیستی^۴ و جذب‌زیستی^۵ قابل اجرا است (۱۲). طی سال‌های اخیر محققین با بهره‌گیری از خصلت جذب‌زیستی بیوماس میکروبی زنده و یا مرده درصدد توسعه‌ی تکنیک‌های احیایی و اصلاحی جدیدی برای مکان‌های آلوده به فلزات برآمدند و به موفقیت‌های قابل ملاحظه‌ای نیز دست یافته‌اند. به‌طور کلی، میکروب‌های پروکاریوت طی فرآیندی بی‌اثر، از طریق چسباندن کاتیون‌های فلزی به سطح سلول‌های خود اقدام به انباشت این فلزات می‌نمایند. در این راستا، مطالعات گسترده‌ای به منظور بررسی جذب زیستی فلزات توسط

مورد نیاز برای رشد آن‌ها می‌باشد. پیشرفت‌های به دست آمده در زمینه‌ی آگاهی از نقش ریزجانداران درگیر در فناوری زیست‌پالایی، به همراه توانایی تنظیم فعالیت آن‌ها با استفاده از ابزارهای زیست‌شناسی مولکولی منجر به توسعه‌ی فرآیندهای زیست‌پالایی بدیع و یا بهبود یافته خواهد شد (۴).

زیست‌پالایی تکنیکی مقرون به صرفه و ساده است که عموماً از مقبولیت عمومی بالایی برخوردار می‌باشد و به دلیل سازگار بودن با کارکردهای زیستی، امکان اجرای آن در مکان‌های آلوده بدون آنکه تأثیر سوئی بر حاصل‌خیزی و فعالیت‌های متابولیکی میکروب‌های خاک داشته باشد، وجود دارد. این ویژگی زیست‌پالایی مانع از انتقال آلاینده‌ها از مکان آلوده به مکان دیگر می‌شود و متعاقباً خطرات بالقوه‌ای را که می‌تواند در طی جابه‌جایی آلاینده‌ها برای سلامتی انسان و محیط زیست به وجود آید را کاهش می‌دهد. به علاوه، فناوری زیست‌پالایی برای پالایش طیف وسیعی از آلاینده‌های محیط‌زیستی مناسب می‌باشد و به واسطه‌ی دگرگونی یا تجزیه‌ی این آلاینده‌ها سبب کاهش سمیت آن‌ها می‌شود. فناوری زیست‌پالایی دارای کاستی‌هایی نیز می‌باشد، به عنوان مثال ممکن است فرآورده‌های حاصل از تجزیه یا دگرگونی زیستی آلاینده‌ها از ماندگاری و سمیت بیشتری نسبت به ترکیبات اولیه برخوردار باشند. به علاوه، از آنجایی که فرآیندهای بیولوژیکی غالباً اختصاصی هستند، لذا این فرآیندها به جوامع میکروبی خاصی که موفقیت آن‌ها وابسته به وضعیت غذایی خاک و سطوح آلاینده‌های موجود در مکان آلوده است، نیاز دارند و از طرف دیگر، زیست‌پالایی فرآیندی زمان‌بر است و معضلات متعددی بر سر راه گذار موفقیت‌آمیز آن از مرحله‌ی آزمایشگاهی به مرحله‌ی میدانی وجود دارد. به هر حال، نظر به اینکه زیست‌پالایی روش جایگزین مناسبی برای فناوری‌های پالایشی مرسوم می‌باشد، لذا تحقیقات در این زمینه به سرعت رو به گسترش است (۴).

۱- Biostimulation

۲- Biotransformation

۳- Bio reduction

۴- Bioaccumulation

۵- Biosorption

(۱۴). به عنوان مثال، در میان فرم‌های مختلف کروم، فرم شش‌ظرفیتی آن به دلیل برخورداری از انحلال‌پذیری بالا در آب، نفوذپذیری سریع در غشاهای زیستی و متعاقباً برهم‌کنش نشان دادن با ماکرومولکول‌های درون سلولی (۱۵)، دارای بیش‌ترین سمیت و قدرت سرطان‌زایی می‌باشد (۱۶). احیای کروم شش‌ظرفیتی سمی به فرم سه‌ظرفیتی کروم، به عنوان فرآیندی سودمند جهت پالایش خاک‌های آلوده به این فلز سنگین در نظر گرفته می‌شود. سم‌زدایی یا احیای کروم شش‌ظرفیتی توسط میکروب‌ها فرآیندی کم‌هزینه و روشی ایمن برای محیط‌زیست است و گزینه‌ای مؤثر جهت حفاظت از محیط خاک در مقابل سمیت فلز سنگین کروم، فراهم می‌آورد. در این راستا، بسیاری از ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه نظیر *Pseudomonas*، *Ochrobacterium intermedium*، *Bacillus* sp. و *Mesorhizobium* sp. از توانایی کاهیدن (احیای) کروم شش‌ظرفیتی برخوردار هستند (۱).

۳- گیاه‌پالایی

حساسیت و یا تحمل گیاهان نسبت به فلزات سنگین شدیداً تحت‌تأثیر گونه و ژنوتیپ گیاه قرار می‌گیرد. از این لحاظ، گیاهان را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود: ۱- طردکنندگان^۴، ۲- نشانگرها^۵ و ۳- انباشتگرها^۶ (شکل ۲). در میان این سه دسته، گیاهان متعلق به گروه طردکننده نسبت به طیف وسیعی از غلظت‌های فلزی حساس هستند و از طریق مکانیسم‌های محدودکننده‌ی جذب فلز بقای خود را در خاک‌های آلوده حفظ می‌کنند، در حالی‌که گیاهان نشانگر بر فرآیندهای جذب و انتقال فلز و متعاقباً واکنش نشان دادن نسبت به غلظت‌های فلزی موجود در خاک دارای کنترل وضعیفی هستند. گراس‌ها (نظیر سودان‌گراس، علف پشمکی (بروم‌گراس) و فستوکا^۷ و غیره) در گروه گیاهان طردکننده قرار می‌گیرند، در حالی‌که گیاهان و غلات دانه‌ای (نظیر ذرت، سویا،

سویه‌های ریزوباکتریایی محرک رشد گیاه به اجرا در آمده است (۱۲). به عنوان مثال، هرناوندز و همکاران (۱۹۹۸) سه گونه‌ی باکتریایی متعلق به خانواده‌ی آنتروباکتریاسه^۱ را که قادر به انباشت نیکل و وانادیم بودند از خاک جداسازی کردند. نتایج مطالعه‌ای دیگر حاکی از جذب زیستی فلزات سنگین کادمیم، مس، سلنیوم و روی توسط گونه‌های باکتریایی *Streptococcus aureus*، *Streptococcus faecalis*، *Bacillus licheniformis*، *Bacillus subtilis* و *Proteus vulgaris*، *Pseudomonas aeruginosa* و *Serratia marscecens*، که در مخلوط‌هایی از باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی حضور داشتند، بود (۴).

به‌طور کلی، در باکتری‌های گرم مثبت میان گروه‌های فسفر آلی تیکوئیک اسید^۲ موجود در سطح سلول و آلاینده‌های فلزی کمپلکس تشکیل می‌شود. به عنوان مثال، ترکیب فسفات اورانیوم (VI) دارای کم‌ترین میزان حلالیت در میان تمامی ترکیبات جامد اورانیوم (VI) می‌باشد. در مقابل، به نظر می‌رسد که باکتری‌های گرم منفی به دلیل عدم برخورداری از این گروه‌های فسفر آلی در سطح سلول خود دارای توانایی کم‌تری برای جذب اورانیوم هستند. لایه‌ی سطحی پروتئین‌دار کریستاله که تحت عنوان لایه‌ی S نامیده شده و توانایی جذب سطحی باکتری‌های گرم مثبت را کاهش می‌دهد، یکی از رایج‌ترین ساختارهای سطحی است که هم در باکتری‌ها و هم در آرکیئا^۳ یافت می‌شود (۴).

از طرف دیگر، به‌طور کلی امکان تجزیه و تخریب زیستی فلزات سنگین وجود ندارد، لذا این آلاینده بدون تغییر در محیط باقی می‌مانند. با این وجود، ریزجانداران خاک قادرند طیف وسیعی از فلزات چندظرفیتی را که تهدید اصلی برای سلامتی محیط‌زیست به شمار می‌آیند، دگرگون سازند. در این راستا، تاکنون تعداد زیادی از ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه که دارای توانایی احیای فلزات سنگین هستند شناسایی شده‌اند

۴- Excluders

۵- Indicators

۶- Accumulators

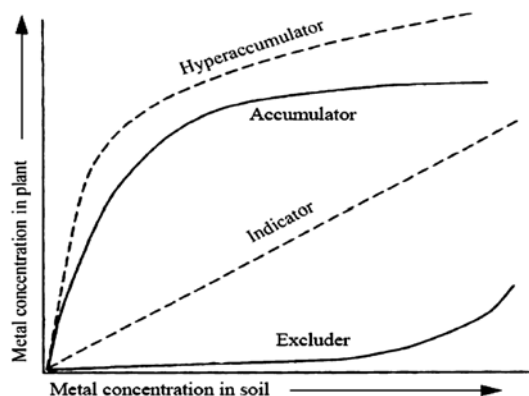
۷- Fescue

۱- Enterobacteriaceae

۲- Teichoic Acid

۳- Archaea

توجهات فراوانی را به سوی خود جلب نموده است (۲۱). به‌طور کلی، غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی گیاهان بیش‌اندوز یک تا سه برابر بیشتر از گیاهان غیربیش‌اندوز می‌باشد (شن و همکاران، ۱۹۹۷).



شکل ۲- استراتژی‌های مختلف جذب فلز توسط گیاهان بسته به غلظت فلز در خاک (اقتباس شده از منبع ۱۷).

ریشه‌ها نخستین اندام گیاهی هستند که با فلزات سنگین موجود در خاک آلوده تماس پیدا می‌کنند و یون‌های فلزی پس از جذب توسط ریشه‌ها به اندام‌های مختلف گیاه انتقال می‌یابند (شکل ۳). همان‌گونه که در تصویر ۴ نشان داده شده است، گیاهان در خاک‌هایی که شدیداً به فلزات سنگین آلوده هستند دچار آسیب‌های گوناگون می‌شوند و این آسیب‌ها از طریق غیرفعال کردن فتوسنتز، سنتز پروتئین و DNA، فعالیت روزنه‌ای و تولید رادیکال‌های آزاد موجب مرگ گیاه خواهند شد (۱). با این وجود، گیاهان می‌توانند از طریق جذب و انباشت نمودن فلزات سنگین و یا به واسطه‌ی سنتز کمپلکس‌های پیونددهنده‌ی فلز و کلات‌های گیاهی، بقای خود را در خاک‌های آلوده به فلز حفظ نمایند (۲۲). کلات‌های گیاهی، پپتیدهای گاما-گلوتامیل ساده‌ای هستند که تشکیل آن‌ها در پاسخ به چالش فلزات سنگین یکی از نخستین واکنش‌های سازگاری مشاهده شده در گیاهان است (۴).

به‌طور کلی، گیاهان به منظور حفاظت از خود در مقابل سمیت فلزی، یک یا ترکیبی از مکانیسم‌های زیر را اتخاذ

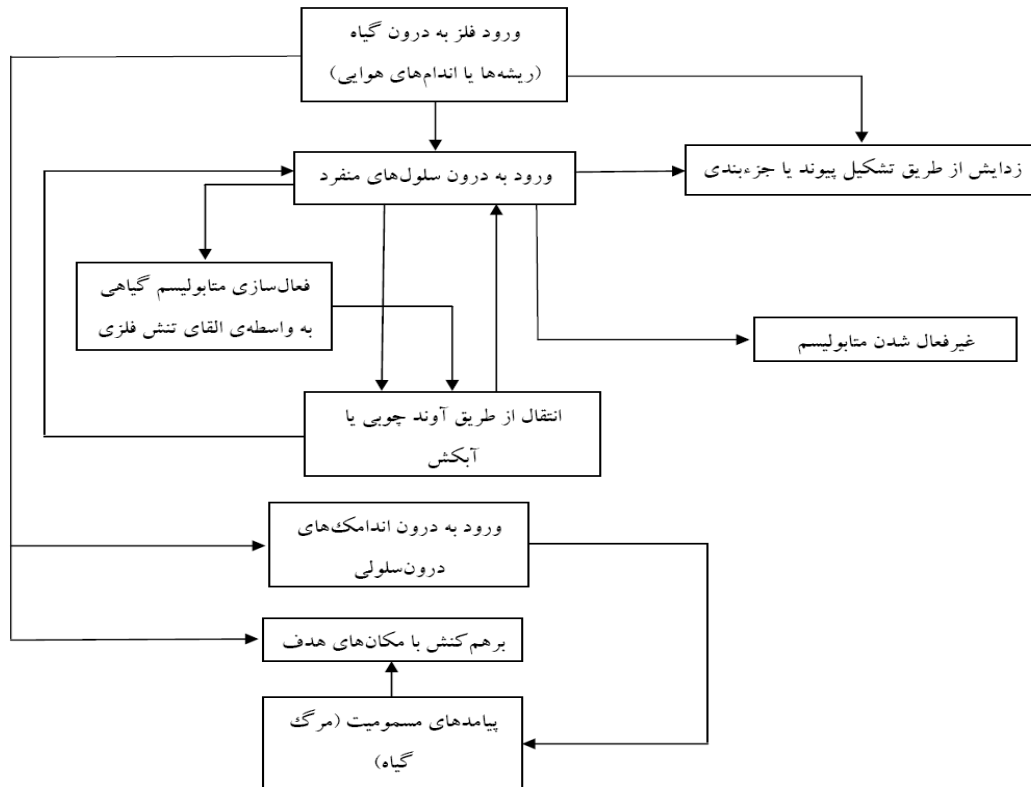
کنند، یولاف و غیره) جزء دسته‌ی نشانگرها می‌باشند (۱۷). گیاهان متعلق به گروه انباشتگر از ورود فلزات سنگین به درون ریشه‌های خود جلوگیری ننموده و از این رو، مکانیسم‌های منحصربه‌فردی را به منظور سم‌زدایی از غلظت‌های بالای فلزات انباشت شده در سلول‌های خود توسعه داده‌اند. گیاهان رایجی که در این گروه قرار می‌گیرند شامل تنباکو (*Nicotiana tabacum* L.)، خردل (*Brassica campestris*) و گونه‌های خانواده‌ی اسفناج (نظیر کاهو، اسفناج و غیره) می‌باشند. در میان گیاهان انباشتگر، برخی از گونه‌ها دارای توانایی فوق‌العاده‌ای در جذب و انباشت غلظت‌های بالای فلزات سنگین می‌باشند و به همین خاطر تحت‌عنوان گونه‌های بیش‌اندوز^۱ نامیده می‌شوند. این توانایی خارق‌العاده‌ی گیاهان بیش‌اندوز امکان زنده ماندن و حتی رشد کردن آن‌ها در خاک‌های به شدت آلوده به فلز را فراهم می‌آورد (۴). اصطلاح بیش‌اندوز نخستین بار توسط بروکس و همکاران (۱۹۷۷) به منظور توصیف گونه‌های گیاهی که در زیستگاه‌های طبیعی خود قادر به انباشت غلظت‌های بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم وزن خشک اندام هوایی هستند، معرفی شد.

این حد انباشت فلز برای فلزاتی نظیر کبالت، مس و سرب نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که برای کادمیم و روی حد آستانه‌ای به ترتیب ۱۰۰ و ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک اندام‌های هوایی می‌باشد (۱۹). اغلب گونه‌های معروف انباشتگر فلزات سنگین به خانواده‌های شببو یا پروانه‌آسا تعلق دارند. با این وجود، اخیراً بیش از ۴۰۰ گونه‌ی گیاهی به عنوان گیاه بیش‌اندوز معرفی شده‌اند و تعداد قابل‌ملاحظه‌ای از آن‌ها دارای قابلیت انباشت دو یا تعداد بیشتری از عناصر سمی می‌باشند (۲۰). در میان گیاهان انباشتگر فلز، خردل هندی (*Brassica juncea* L. Czern یکی از نویدبخش‌ترین گونه‌ها است که به دلیل بر خورداری از توانایی رشد کردن در خاک‌های شدیداً آلوده و همچنین جذب و انباشت نمودن یون‌های فلزی،

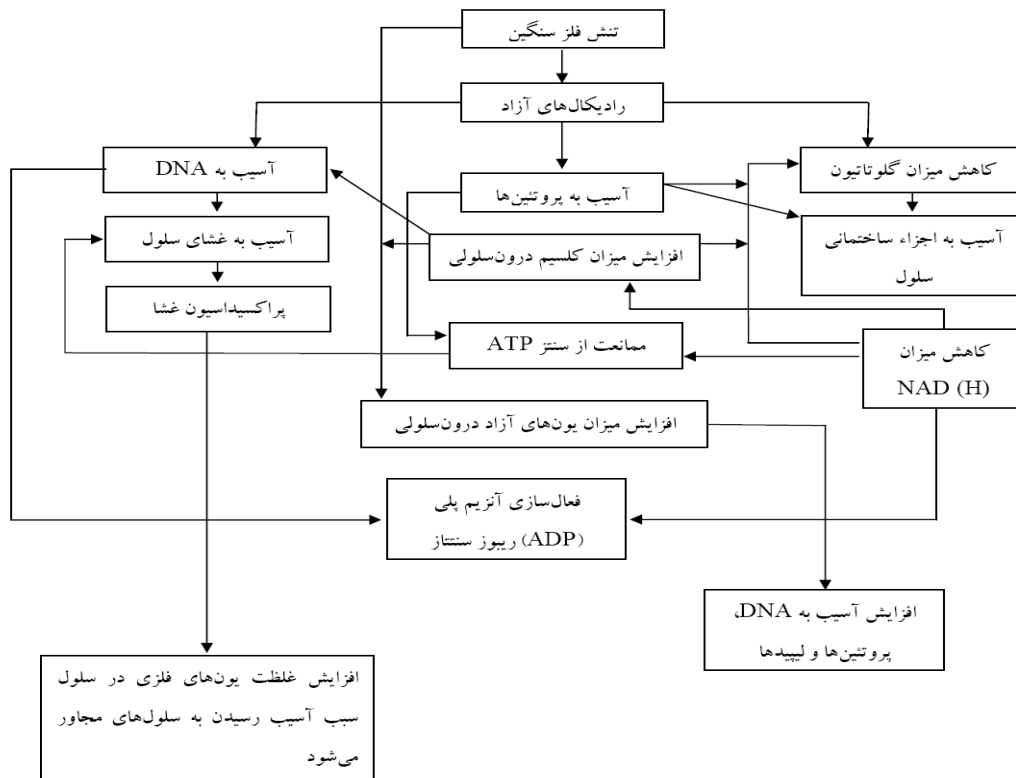
۱- Hyper-accumulators

می نمایند. این فرآیندها می توانند شامل موارد زیر باشند: ۱- استخراج گیاهی^۱: تکنیکی کم هزینه است که از طریق آن فلزات از خاک آلوده حذف می شوند و یا در بخش های مختلف گیاه تجمع می یابند. این فرآیند منجر به تولید توده ای از بقایای گیاهی و آلاینده ها (معمولاً فلزات) می شود که به منظور امحا و باز یافت مواد با ارزش موجود در آن، از مکان آلوده به مکان دیگری انتقال می یابد، ۲- دگرگونی گیاهی^۲ یا دگرگونی ریزوسفری^۳: فلزات سنگین به وسیله ی پروتئین ها یا آنزیم های تولید شده توسط گیاهان و میکروب های همزیست آن ها دگرگون می شوند، ۳- تصفیه ی ریزوسفری^۴: فلزات توسط ریشه های گیاه جذب می شوند، ۴- تثبیت گیاهی^۵: در این تکنیک، فلزات غیرمتحرک شده و تحرک و قابلیت جذب آن ها توسط ریشه های گیاه کاهش می یابد. طی فرآیند تثبیت گیاهی، بخش قابل آبشویی فلزات بر سطح ریشه های گیاه جذب شده و کمپلکس پایداری را با ساختمان گیاه تشکیل می دهند و بدین طریق از ورود مجدد آن ها به درون محیط زیست جلوگیری می شود و ۵- تبخیر گیاهی^۶: تبخیر آلاینده های موجود در خاک توسط گیاهان به درون اتمسفر. به طور کلی، از تکنیک های مختلف گیاه پالایی در مکان های وسیعی که پاکسازی آن ها به وسیله ی سایر روش های پالایشی بسیار پرهزینه و یا حتی غیر عملی است، استفاده می شود (۴).

-
- ۱- Phytoextraction
 - ۲- Phytodegradation
 - ۳- Rhizodegradation
 - ۴- Rhizofiltration
 - ۵- Phytostabilization
 - ۶- Phytovolatilization



شکل ۳- نمودار نشان‌دهنده‌ی توالی وقایعی که از هنگام ورود فلز به درون گیاه تا مرگ آن رخ می‌دهند (۴).



شکل ۴- متابولیسم گیاهان آسیب دیده به وسیله فلزات سنگین (۴)

برون سلولی^۴ (مانند باکتری های جنس باسیلوس، سودوموناس، آزتوباکتر و غیره) به آن ها اطلاق می گردد (۴).

این ریزجانداران به سه شیوهی مختلف رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می دهند: ۱- به وسیله سنتز و فراهم آوردن ترکیبات ویژه برای گیاهان، ۲- تسهیل فرآیند جذب برخی عناصر غذایی از محیط و ۳- حفاظت از گیاه در مقابل بیماری های خاص (۲۴). به طور کلی، ریزوباکتری ها به واسطه سنتز ترکیبات پیش ساز هورمون های گیاهی، ویتامین ها، آنزیم ها، سیدروفورها، آنتی بیوتیک ها و جلوگیری از سنتز اتیلین سبب بهبود رشد گیاه می شوند. به علاوه، سویه های ریزوباکتریایی قادر به انحلال فسفر غیرآلی، معدنی کردن فسفرآلی و بهبود تحمل گیاه نسبت به تنش های خشکی، شوری و فلزات سنگین می باشند و بدین طریق رشد گیاه را افزایش می دهند (۲۵).

۳-۱- ارتقای رشد توسط ریزوباکتری های محرک رشد گیاه

باکتری های ریزوسفری که قادرند فعالانه بر سطح و یا درون ریشه های گیاه تشکیل کلونی داده و متعاقباً رشد گیاه میزبان را ارتقا دهند، عموماً تحت عنوان ریزوباکتری های محرک رشد گیاه نامیده می شوند. به طور کلی، ریزوباکتری های محرک رشد گیاه را می توان بر اساس رابطه ی آن ها با گیاهان میزبان به دو گروه اصلی تقسیم نمود: ۱- ریزوباکتری های همزیست^۱ و ۲- ریزوباکتری های آزادزی^۲ (۶). این ریزوباکتری ها یا درون سلول های گیاه میزبان تشکیل کلونی می دهند و تحت عنوان ریزوباکتری های محرک رشد درون سلولی^۲ نامیده می شوند (مانند باکتری های گره زها) و یا در فضای خارج از سلول های گیاه باقی می مانند و اصطلاح ریزوباکتری های محرک رشد

۱- Symbiotic rhizobacteria

۲- Free-living rhizobacteria

۳- Intracellular PGPR

۴- Extracellular PGPR

یعنی آندرانلیک اسید^۶ دارای توانایی انحلال کاهشی آهن موجود در خاک و افزایش قابلیت جذب آن از طریق مکانیسمی متفاوت از آنچه به وسیله سیدروفورها صورت می‌گیرد، می‌باشند (۱). لیپمان و همکاران (۱۹۹۵) اظهار داشتند که افزودن ایندول استیک اسید به خاک سبب بهبود جذب آهن و سایر عناصر (نظیر روی، کلسیم و غیره) توسط ریشه‌های گیاه می‌شود.

سیدروفورها^۷ یکی دیگر از مواد محرک رشد می‌باشند که به طور اختصاصی با آهن (III) تشکیل کلات داده و آهن کلات شده را برای ریزجانداران بیماری‌زا غیر قابل استفاده می‌کنند و بدین طریق سبب بهبود سلامتی گیاه می‌شوند (۲۸). مشخص شده است که سیدروفورهای میکروبی قابلیت جذب آهن موجود در ریزوسفر گیاه را تنظیم می‌کنند و از طرف دیگر، محققین دریافته‌اند که رقابت بر سر آهن موجود در ریزوسفر به وسیله میل ترکیبی سیدروفور با آهن کنترل می‌شود. نکته‌ی جالب توجه آن است که میل ترکیبی سیدروفورهای گیاهی با آهن کم‌تر از سیدروفورهای میکروبی می‌باشد و گیاهان برای رشد طبیعی خود به غلظت‌های پایین‌تری از آهن در مقایسه با میکروب‌ها نیاز دارند (۲۹).

۳-۲- ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، کارآیی گیاه‌پالایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

به دلیل از بین رفتن ریزجانداران سودمند در خاک‌های آلوده به فلز، این خاک‌ها غالباً از حاصل‌خیزی اندکی برخوردار هستند و یا حتی در بعضی از موارد با کمبود عناصر غذایی مورد نیاز جهت رشد مطلوب گیاهان و ریزجانداران مواجه می‌باشند. با این وجود، می‌توان از طریق کاربرد ماهی‌تلقیح میکروب‌های متحمل به فلز و به‌ویژه ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، این خاک‌ها را از لحاظ عناصر غذایی غنی نمود. از طرف دیگر، این ریزوباکتری‌ها نه تنها عناصر غذایی ضروری را برای گیاهان در حال رشد در خاک‌های آلوده فراهم می‌آورند، بلکه از نقش مهمی در سم‌زدایی از یون‌های فلزی نیز برخوردار هستند و

علاوه بر این، ریزوباکتری‌های محرک رشد از طریق سنتز آنزیم‌های ویژه‌ای که موجب القای تغییرات فیزیولوژیکی در گیاهان می‌شوند نیز رشد گیاه را افزایش می‌دهند. به عنوان مثال، اتیلن در فرآیندهای نموی مختلف نظیر پیری برگ، ریزش برگ، روخمش (اپیناستی) و رسیدگی میوه نقش مهمی بر عهده دارد. به علاوه، اتیلن سبب تنظیم فاکتور پیام‌رسان گرده‌دهی و تشکیل گره در گیاهان می‌شود و دارای کارکردهای عمده‌ای در سیستم‌های دفاعی گیاه نیز می‌باشد. از طرف دیگر، در نتیجه‌ی آلوده شدن گیاه توسط باکتری‌های ریزوسفری نیز میزان تولید اتیلن افزایش می‌یابد. با این وجود، اتیلن در غلظت‌های بالا مانع از رشد و نمو گیاه می‌شود، در حالی‌که آنزیم باکتریایی ۱-آمینوسیکلوپروپان-۱-کربوکسیلات (ACC) دی‌آمیناز تولید شده توسط ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه سبب کاهش اثرات مخرب تنش ناشی از سطوح بالای اتیلن بر گیاه می‌گردد (۳). ACC ریشه‌ها توسط آنزیم ACC-دی‌آمیناز به کتوتیرات^۵ و آمونیاک تجزیه می‌شود. باکتری‌های ریزوسفری از آمونیاک حاصل از تجزیه‌ی ACC به عنوان منبع نیتروژن استفاده نموده و بدین طریق سبب کاهش تجمع اتیلن در بافت‌های گیاهی می‌گردند (۲۶).

باکتری‌های هم‌زیست تثبیت‌کننده‌ی نیتروژن نیز در زمره‌ی ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه قرار دارند که با استفاده از مکانیسم‌های زیر سبب ارتقای رشد گیاهان خانواده‌ی لگوم می‌شوند: ۱- تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه از طریق تثبیت نیتروژن اتمسفر، ۲- افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی موجود در ناحیه‌ی ریزوسفر، ۳- القای افزایش در مساحت سطح ریشه، ۴- بهبود سایر روابط هم‌زیستی گیاه میزبان و ۵- کاهش یا ممانعت از اثرات مخرب ناشی از پاتوژن‌های گیاهی (۲۷). به عنوان مثال، بسیاری از باکتری‌های ریزوبیوم قادر به ترشح هورمون گیاهی ایندول استیک اسید (IAA) می‌باشند که این هورمون و پیش‌ساز متابولیکی آن

^۶- Anthranilic Acid

^۷- Siderophores

^۵- Ketobutyrate

کاربرد مایه‌ی تلقیح ریزوباکتری‌های متحمل به فلز مشاهده شده است، وابسته به توانایی سویه‌های باکتریایی در کاهش اثرات سمی فلزات با استفاده از مکانیسم‌هایی که پیش از این مورد بحث قرار گرفتند و همچنین تولید مقادیر کافی مواد محرک رشد گیاه توسط این سویه‌ها می‌باشد. بنابراین، می‌توان به منظور افزایش زیست‌توده‌ی گیاهی و در نتیجه تثبیت، رویاندن، احیاء و پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، تلقیح گیاهان متحمل به فلز را توسط ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه توصیه نمود (۴).

نتیجه‌گیری

پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با استفاده از سیستم‌های بیولوژیکی (شامل میکروب‌ها و گیاهان) یکی از زمینه‌های تحقیقاتی نوین می‌باشد که طی سال‌های اخیر دستاوردهای شگرفی را نیز به همراه داشته است. این در حالی است که نیاز به توانمندسازی فناوری نوظهور زیست‌پالایی از طریق اجرای آزمون‌های میدانی متعدد تحت شرایط اقلیمی مختلف احساس می‌شود. از طرف دیگر، آگاهی یافتن از مکانیسم فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی ناحیه‌ی ریزوسفر و برهم‌کنش‌های میان گیاهان بیش‌اندوز، غیربیش‌اندوز و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند در شبیه‌سازی مطلوب‌تر اثرات مرتبط با گیاه‌پالایی مناطق آلوده به فلزات سنگین دارای اهمیت باشد. علاوه بر این، پالایش مکان‌های آلوده به فلزات سنگین با استفاده از ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه نیز تکنیکی مؤثر و در عین حال مقرون‌به‌صرفه جهت تیمار آلاینده‌های فلزی محسوب می‌شود، چرا که این ریزجانداران به آسانی و بدون صرف هزینه‌ی زیاد، انبوهی از سلول‌های باکتریایی را تولید می‌کنند. با این وجود، به منظور تبدیل نمودن زیست‌پالایی به گزینه‌ای مطلوب جهت پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بایستی برخی از مسایل مربوط به این فناوری نظیر مکانیسم‌های درگیر در جذب و سم‌زدایی از یون‌های فلزی و همچنین عوامل مؤثر

بدین طریق گیاهان را قادر به پالایش فلزات سنگین می‌نمایند (۳۰). به عنوان مثال، هنگامی‌که ریزوباکتری محرک رشد *Kluyvera ascorbata* SUD۱۶۵ در خاک‌های تیمار شده با فلزات سنگین نیکل، روی، سرب و کروم مورد استفاده قرار گرفت، موجب افزایش رشد کلزا (*Brassica napus*) و در عین حال، محافظت از بوته‌های این گیاه در مقابل سمیت نیکل گردید (۳۱). به همین ترتیب، کاربرد ریزوباکتری مقاوم به نیکل *Kluyvera ascorbata* در خاک‌های تیمار شده با نیکل، سرب و روی سبب حفاظت از بوته‌های گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.)، خردل هندی (*Brassica juncea*) و کلزا در مقابل سمیت این فلزات شد (بورد و همکاران، ۲۰۰۰). علاوه بر این، ریزوباکتری‌های محرک رشد *Rhodococcus sp.*, *Variovorax paradoxus* و *Flavobacterium sp.* در حضور و یا عدم حضور فلز سمی کادمیم سبب افزایش طول ریشه‌ی گیاهچه‌های خردل هندی شدند (۳). لذا، می‌توان از مایه‌ی تلقیح این سویه‌های باکتریایی به منظور بهبود رشد گونه‌ی بیش‌اندوز خردل هندی تحت شرایط وجود غلظت‌های سمی کادمیم در محیط و همچنین توسعه‌ی سیستم‌های موثر گیاه-باکتری جهت پالایش خاک‌های آلوده به فلز سنگین کادمیم استفاده نمود. به همین نحو، رشد بوته‌های کلزای تلقیح شده با باکتری *Enterobacter cloacae* در خاک آلوده به آرسنیک، به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بوته‌های تلقیح نشده بود (۳۲). در سایر مطالعات، ریزوباکتری‌های *Ochrobacterium intermedium* و *Bacillus cereus* از بوته‌های ماش در مقابل سمیت کروم محافظت نمودند و باکتری *Ochrobacterium intermedium* رشد کلی بوته‌های آفتابگردان (*Helianthus annuus*) کشت شده در خاک‌های آلوده به فلز را بهبود بخشید (۱۴). در دیگر مطالعات، ریزوباکتری‌های محرک رشد متحمل به فلز به‌طور چشم‌گیری از گیاهان در مقابل سمیت فلزی محافظت نمودند و متعاقباً رشد، همزیستی و عملکرد دانه‌ی آن‌ها را بهبود بخشیدند (۱). افزایش رشدی که در گیاهان تحت تنش فلز سنگین به‌واسطه‌ی

- CSSA and SSSA, Madison, pp. ۴۵۷-۵۰۸.
۶. Khan, A.G. ۲۰۰۵. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, vol. ۱۸, ۳۵۵-۳۶۴.
۷. Lippmann, B., Leinhos, V., Bergmann, H. ۱۹۹۵. Influence of auxin producing rhizobacteria on root morphology and nutrient accumulation of crops. ۱. Changes in root morphology and nutrient accumulation in maize (*Zea mays* L.) caused by inoculation with indole-۳-acetic acid (IAA) producing *Pseudomonas* and *Acinetobacter* strains or IAA applied exogenously. *Angewandte Botany*, vol. ۶۹, pp. ۳۱-۳۶.
۸. Krishnamurti, G.S.R. ۲۰۰۰. Speciation of heavy metals: an approach for remediation of contaminated soils, in remediation engineering of contaminated soils. Marcel Dekker Inc, New York, pp. ۶۹۳-۷۱۴.
۹. Muller, J.G., Cerniglia, C.E., Pritchard, P.H. ۱۹۹۶. Bioremediation of environments contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons. In: Ronald, L.C., Crawford. D.L. (eds), *Bioremediation: principles and applications*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. ۱۲۵-۱۹۴.
۱۰. Khan, A.G. ۲۰۰۴. Mycotrophy and its significance in wetland ecology and wetland management. In: Wong, M.H. (ed), *Developments in ecosystems*, بر تحرک و انتقال فلزات سنگین به‌طور ویژه مورد توجه قرار گیرند.
- منابع
۱. Wani, P.A., Khan, M.S., Zaidi, A. ۲۰۰۸. Chromium reducing and plant growth promoting *Mesorhizobium* improves chickpea growth in chromium amended soil. *Biotechnology Letters*, vol. ۳۰, pp. ۱۵۹-۱۶۳.
۲. Zaidi, A., Khan, M.S. ۲۰۰۶. Co-inoculation effects of phosphate solubilizing microorganisms and *Glomus fasciculatum* on greengram-*Bradyrhizobium* symbiosis. *Turkian Journal of Agriculture and Forestry*, vol. ۳۰, pp. ۲۲۳-۲۳۰.
۳. Belimov, A.A., Hontzeas, N., Safronova, V.I., Demchinskaya, S.V., Piluzza, G., Bullitta, S., Glick, B.R. ۲۰۰۵. Cadmium-tolerant plant growth promoting rhizobacteria associated with the roots of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.). *Soil Biology and Biochemistry*, vol. ۳۷, pp. ۲۴۱-۲۵۰.
۴. Saghir Khan, M., Zaidi, A., Ahmad Wani, P., Oves, A. ۲۰۰۹. Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils. *Environmental chemistry letters*, vol. ۷, pp. ۱-۱۹.
۵. Wenzel, W.W., Adriano, D.C., Salt, D., Smith, R. ۱۹۹۹. Phytoremediation: a plant-microbe-based remediation system. In: Adriano, D.C., et al. (eds), *Bioremediation of contaminated soils*. Agronomy monographs ۳۷. ASA,

- Contamination and Toxicology, vol. ۱۷۸, pp. ۱۰۷۶-۱۰۸۴.
۱۷. Adriano, D.C. ۲۰۰۱. Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, New York, p. ۸۶۶.
۱۸. Brooks, R.R., Lee, J., Reeves, R.D., Jaffre, T. ۱۹۷۷. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimen of indicator plants. Journal of Geochemical Exploration, vol. ۷, pp. ۴۹-۵۷.
۱۹. Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R.D., Smith, J.A.C. ۲۰۰۰. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metalpolluted soils. In: Terry, N., Baelos, G., (eds), Phytoremediation of contaminated soil and water. CRC Press, Boca Raton, pp. ۸۵-۱۰۷.
۲۰. Hayes, W.J., Chaudhry, R.T., Buckney, R.T., Khan, A.G. ۲۰۰۳. Phytoaccumulation of trace metals at the Sunny Corner mine, New South Wales, with suggestions for a possible remediation strategy. Australian Journal of Ecotoxicology, vol. ۹, pp. ۶۹-۸۲.
۲۱. Blaylock, M.J., Huang, J.W. ۲۰۰۰. Phytoextraction of metals. In: Raskin, I., Ensley, B.D., (eds), Phytoremediation of toxic metals using plants to clean-up the environment. Wiley, New York, pp. ۵۳-۷۰.
- vol. ۱. Elsevier, Northhampton, pp. ۹۷-۱۱۴.
۱۱. Penrose, D.M., Glick, B.R. ۲۰۰۱. Levels of ۱-aminocyclopropane-۱-carboxylic acid (ACC) in exudates and extracts of canola seeds treated with plant growth promoting bacteria. Canadian Journal of Microbiology, vol. ۴۷, pp. ۳۶۸-۳۷۲.
۱۲. Lloyd, J.R., Macaskie, L.E. ۲۰۰۰. Bioremediation of radioactive metals. In: Lovley, D.R., (ed), Environmental microbe-metal interactions. ASM Press, Washington, pp. ۲۷۷-۳۲۷.
۱۳. Hernandez, A., Mellado, R.P., Martinez, J.L. ۱۹۹۸. Metal accumulation and vanadium induced multidrug resistance by environmental isolates of *Escherichia herdmanni* and *Enterobacter cloacae*. Applied and Environment Microbiology, vol. ۶۴, pp. ۴۳۱۷-۴۳۲۰.
۱۴. Faisal, M., Hasnain, S. ۲۰۰۵. Bacterial Cr (VI) reduction concurrently improves sunflower (*Helianthus annuus* L.) growth. Biotechnology Letters, vol. ۲۷, pp. ۹۴۳-۹۴۷.
۱۵. McLean, J., Beveridge, T.J. ۲۰۰۱. Chromate reduction by *Pseudomonas* isolated from a site contaminated with chromated copper arsenate. Applied and Environment Microbiology, vol. ۶۷, pp. ۱۰۷۶-۱۰۸۴.
۱۶. Kamaludeen, S.P., Megharaj, M., Juhasz, A.L., Sethunathan, N., Naidu, R. ۲۰۰۳. Chromium-microorganism interactions in soil remediation implications. Reviews of Environment

- growth, yield and nutrient uptake of greengram. *Journal of plant nutrition and soil Science*, vol. ۲۷, pp. ۵۹۹-۶۱۰.
۲۸. Wang, Y., Brown, H.N., Crowley, D.E., Szaniszlo, P.J. ۱۹۹۳. Evidence for direct utilization of a siderophore, ferroxamine B, in axenically grown cucumber. *Plant, Cell and Environment*, vol. ۱۶, pp. ۵۷۹-۵۸۵.
۲۹. Meyer, J.M. ۲۰۰۰. Pyoverdines: pigments, siderophores and potential taxonomic markers of fluorescent *Pseudomonas* species. *Archives of Microbiology*, vol. ۱۳۷, pp. ۱۳۵-۱۴۲.
۳۰. Mayak, S., Tirosh, S., Glick, B.R. ۲۰۰۴. Plant growth promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. *Plant Physiology*, vol. ۱۶۶, pp. ۵۲۵-۵۳۰.
۳۱. Burd, G.I., Dixon, D.G., Glick, B.R. ۱۹۹۸. A plant growth promoting bacterium that decreases nickel toxicity in seedlings. *Applied and Environment Microbiology*, vol. ۶۴, pp. ۳۶۶۳-۳۶۶۸.
۳۲. Nie, L., Shah, S., Burd, G.I., Dixon, D.G., Glick, B.R. ۲۰۰۲. Phytoremediation of arsenate contaminated soil by transgenic canola and the plant growth promoting bacterium *Enterobacter cloacae* CAL۲. *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. ۴۰, pp. ۳۵۵-۳۶۱.
۲۲. Grill, E., Winnacker, E.U., Zenk, M.H. ۱۹۸۵. Phytochelatin: the principal heavy-metal complexing peptides of higher plants. *Science*, vol. ۲۳۰, pp. ۶۷۴-۶۷۶.
۲۳. Glick, B.R. ۱۹۹۵. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, vol. ۴۱, pp. ۱۰۹-۱۱۷.
۲۴. Khan, M.S., Zaidi, A., Aamil, M. ۲۰۰۲. Biocontrol of fungal pathogens by the use of plant growth promoting rhizobacteria and nitrogen fixing microorganisms. *Indian Journal of Botany Society*, vol. ۸۱ pp. ۲۵۵-۲۶۳.
۲۵. Khan, M.S., Zaidi, A., Wani, P.A. ۲۰۰۷. Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: a review. *Agronomy and Sustainable Development*, vol. ۲۷, pp. ۲۹-۴۳.
۲۶. Belimov, A.A., Safroonova, V.I., Mimura, T. ۲۰۰۲. Response of spring rape to inoculation with plant growth promoting rhizobacteria containing ۱-aminocyclopropane-۱-carboxylate deaminase depends on nutrient status of the plant. *Canadian Journal of Microbiology*, vol. ۴۸, pp. ۱۸۹-۱۹۹.
۲۷. Zaidi, A., Khan, M.S., Aamil, M. ۲۰۰۴. Bioassociative effect of rhizospheric microorganisms on

Plant growth promoting rhizobacteria and their role in remediation of heavy metal contaminated soils

Mohammad Reza Naderi ^{۱*}

mr.naderi.2012@stu-mail.um.ac.ir

Rezvan Naderi^۲

Abstract

The using of plant growth promoting rhizobacteria in order to biological remediation and/or improvement the efficiency of other bioremediation methods of heavy metals contaminated soils has great advantages such as environmental friendly, low cost compared to physical and chemical remediation methods of metal contaminated soils, promotion of soil fertility, raise the biodiversity and etc.. Because of their tolerance to heavy metals, this rhizobacteria are able to adsorb or absorb metal pollutants and also can reduce metals to less toxic forms and thus remediate or immobilize metal. Furthermore, plant growth promoting rhizobacteria have the ability to enhance the plant growth on metal contaminated soils through various mechanisms such as fixation of atmosphere N_۲, phosphate solubilization, secret of Fe-chelating siderophores, and production of growth promoting hormones like auxin and gibberellin and prevention of excessive synthesis of ethylene by enzyme ACC-deaminase and thus, increase the phytoremediation efficiency of these soils. Hence, in this study, we have a brief review on the role of plant growth promoting rhizobacteria in remediation of heavy metal contaminated soils and also their effect on improve the phytoremediation efficiency of metal pollutants.

Key words: Plant growth promoting rhizobacteria, Heavy metals, Bioremediation, Phytoremediation

^۱- - Ph.D student of Crop Ecology, Agriculture Faculty, Ferdowsi University, Mashhad, Iran. (Corresponding Author)

^۲- Msc in Seed Science and Technology, Agricultural Faculty, Birjand University, Mashhad, Iran.