19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

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

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مروری بر فناوری‌های نوین در بهبود گیاه‌پالایی فلزات سنگین خاک

فرناز فضلی[۱]، شایان شریعتی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه:
shayan_shariati@ut.ac.ir

چکیده

گیاه‌پالایی اصطلاح کلی است که به استفاده از گیاهان برای استخراج، کاهش، تبدیل یا تثبیت آلاینده‌های آلی و معدنی موجود در خاک، رسوبات و آب‌های زیرزمینی اشاره دارد. این روش، به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین و پایدار در کاهش آلودگی‌های محیط‌زیست، طیف گسترده‌ای از فرایندها و سازوکارها را در بر می‌گیرد. فناوری‌های نوین به‌کار رفته در بهبود کارایی گیاه‌پالایی نظیر استفاده از عوامل کلات کننده، به‌کارگیری مهندسی ژنتیک و استفاده از میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه (PGPR) کارایی گیاه‌پالایی را در حذف انواع آلاینده‌ها به خصوص فلزات سنگین، به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. در مجموع، گیاه‌پالایی رویکردی پایدار و کم‌هزینه در مدیریت آلودگی‌های محیط‌زیستی است که با تلفیق فناوری‌های نوین، افق‌های تازه‌ای در کاربردهای عملی آن گشوده می‌شود. علاوه بر نقش گیاه‌پالایی در حذف آلاینده‌ها، این فناوری با ارائه فرصت‌های تجاری نوین در حال گسترش است و چشم‌اندازهای امیدوارکننده‌ای در حوزه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: آلودگی خاک، آلاینده‌های آلی، دوست‌دار محیط زیست، زیست پالایی.

مقدمه

در طول قرن‌های اخیر، پیشرفت صنعتی و توسعه جوامع انسانی به‌طور قابل‌توجهی بر کیفیت خاک تأثیر گذاشته و سبب شده تا آلودگی خاک به عنوان یک چالش جهانی مطرح شود. فعالیت‌های مرتبط با کشاورزی، صنعت، معدن و شهرنشینی منجر به رهاسازی مجموعه‌ای از آلاینده‌های سمی به ویژه فلزات سنگین شده و کیفیت محیط‌زیست (خاک، هوا و آب) را تحت تأثیر قرار داده و تضعیف کرده‌اند (Gomes da Silva and Gouveia, 2020). حضور آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین در خاک، این محیط‌ها را به‌طور بالقوه برای موجودات زنده سمی می‌سازد. این مواد سمی به دلیل ماهیت خود، به‌طور مستقیم سلامت انسان را تهدید می‌کنند. فراتر از این سمیت مستقیم، آن‌ها کیفیت خاک را نیز کاهش می‌دهند. تخریب خاک منجر به از دست رفتن خدمات زیست‌بومی حیاتی مانند چرخه مواد مغذی و تصفیه آب می‌شود. این از دست رفتن خدمات زیست‌بومی، تأثیرات منفی بر سلامت و کیفیت زندگی انسان دارد (Kazemalilou et al., 2020; Hembrom et al., 2020; Priya et al., 2023). استفاده از فناوری گیاه‌پالایی (Phytoremediation) به‌عنوان یک روش زیست‌سازگار و پایدار، گزینه‌ای امیدوارکننده برای حذف فلزات سنگین محسوب می‌شود. اهداف اصلی گیاه‌پالایی شامل خاک، آب و رسوباتی است که توسط فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و حتی عناصر رادیواکتیو آلوده شده‌اند (Singh et al., 2016; Wang et al., 2019).

با وجود پیشرفت‌های فراوانی که در سه دهه گذشته حاصل شده، این فن‌آوری گیاهی همچنان در حال توسعه است (Ashraf et al., 2019a). فناوری گیاه‌پالایی مبتنی بر گیاهان، که با انرژی خورشیدی کار می‌کند، کم‌هزینه، مقرون به صرفه، کارآمد و سازگار با محیط زیست است، یک گزینه جایگزین بسیار نویدبخش به شمار می‌رود.گیاه‌پالایی اصطلاح کلی است که به استفاده از گیاهان برای استخراج، کاهش، تبدیل یا تثبیت آلاینده‌های آلی و معدنی موجود در خاک، رسوبات و آب‌های زیرزمینی اشاره دارد (Ashraf et al., 2019b; Liu et al., 2020). استفاده از گیاهان باعث تمرکز یا تجزیه آلاینده‌های موجود در خاک می‌شود و با ایجاد شبکه‌ای از ریشه‌ها، از فرسایش خاک جلوگیری کرده و به این ترتیب، از پراکندگی آلاینده‌ها در محیط زیست ممانعت می‌نماید. همچنین، گیاهان محیط فیزیکوشیمیایی مناسبی برای رشد و توسعه میکروارگانیزم‌های ناحیه ریزوسفری فراهم می‌آورند که قادر به سم‌زدایی آلاینده‌های موجود در خاک هستند (Antoniadis et al., 2017; Ashraf et al., 2019c; Oladoye et al., 2022). علاوه بر مزایای گیاه‌پالایی آلاینده‌ها، این روش دارای چند محدودیت نیز می‌باشد، از جمله رشد کند گیاهان که مانع استفاده سریع و مؤثر از آن‌ها می‌شود و توانایی محدود سازگاری با شرایط محیطی متنوع، مانند خاک‌های فقیر از مواد مغذی. با این حال، این محدودیت‌ها مانع از کاربرد عملی گیاه‌پالایی در پاکسازی محیط‌های آلوده نیستند (Sarwar et al., 2017). امکان ارتقای بیشتر عملکرد گیاه‌پالایی با بهره‌گیری از کمک‌کننده‌های مختلف، مانند اصلاح‌کننده‌های مصنوعی و طبیعی، میکروب‌ها و گیاهان اصلاح‌شده ژنتیکی وجود دارد. این کمک‌کننده‌ها موجب افزایش مقاومت و تحمل گیاه در برابر آلاینده‌ها و ارتقای انتقال و تجمع آنها در بافت‌های گیاهی می‌شوند و در نتیجه، بازده کلی فرآیند گیاه‌پالایی را افزایش می‌دهند (Kafle et al.,2022). علاوه بر نقش گیاه‌پالایی در حذف آلاینده‌ها، این فناوری با ارائه فرصت‌های تجاری نوین نظیر توسعه بام‌های سبز، احیای معادن متروکه و تولید محصولات ارزشمند زیستی در حال گسترش است و چشم‌اندازهای امیدوارکننده‌ای در حوزه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی فراهم می‌کند. هدف این مطالعه، مروری بر فناوری‌های نوین در بهبود فرآیند گیاه‌پالایی فلزات سنگین و بررسی سایر کاربردهای گسترده و چشم‌اندازهای تجاری این روش به‌عنوان روشی نوآورانه و سازگار با محیط زیست است.

رویکردهای نوین در بهبود فرآیند گیاه پالایی فلزات سنگین

علاوه بر مزایای ذکر شده برای روش گیاه‌پالایی، این رویکرد با محدودیت‌هایی نیز همراه است. با توجه به پیچیدگی آلاینده‌های خاص، علاقه‌مندی به بهره‌گیری از فناوری‌های نوین برای افزایش کارایی فرآیند پالایش خاک آلوده رو به افزایش است (Oubohssaine & Dahmani, 2024). گونه‌های گیاهی، و همچنین تحمل محدود آن‌ها در برابر آلودگی‌های شدید، از عوامل اصلی محدودکننده در گیاه‌پالایی به شمار می‌آیند. برای غلبه بر این چالش‌ها، پیشرفت‌های اخیر بر مهندسی ژنتیک، تحریک زیستی، افزودنی‌های اصلاح‌کننده خاک و مداخلات مبتنی بر نانوفناوری متمرکز شده‌اند (Kafle et al., 2022; Lee et al.,2025). پژوهش‌های اخیر بر ضرورت افزایش کارایی گیاه‌پالایی تأکید دارند و پیشنهاد می‌کنند از راهبردهایی استفاده شود که موجب تسریع و تقویت فرآیند شوند؛ از جمله: افزایش رشد گیاهان با میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه (همچون باکتری‌ها و قارچ‌های میکوریزا)، استفاده از عوامل کلات‌کننده و مواد آلی اصلاح‌کننده خاک همچون کمپوست، اعمال میدان الکتریکی، افزودن مواد اصلاح‌کننده خاک (Amendments)، به‌کارگیری الگوهای کاشت مکانی گونه‌های گیاهی متفاوت، و بهره‌گیری از گیاهان تراریخته (Gavrilescu, 2022). در ادامه به معرفی و بررسی هریک از روش‌ها و نحوه بهبود گیاه‌پالایی در هر کدام پرداخته شد.

۱. ارتقای کارایی گیاه‌پالایی به کمک مهندسی ژنتیک

نقش مهندسی ژنتیک در افزایش ظرفیت برخی گیاهان برای گیاه‌پالایی بسیار چشمگیر است. با افزایش بیان ژن‌های خاص که در جذب، انتقال، جداسازی و تحمل گیاهان نسبت به اثرات سمی آلاینده‌ها نقش دارند، کارایی گیاه‌پالایی به‌طور قابل توجهی

بهبود می‌یابد (Gavrilescu, 2022). ژن‌های خارجی از سایر موجودات زنده (حیوانات، گیاهان و میکروارگانیسم‌ها) می‌توانند از طریق ترکیب مجدد DNA به ژنوم گیاه هدف وارد شوند تا عملکرد گیاه‌پالایی بهبود یابد (Wu et al., 2010). ژن‌ها می‌توانند توانایی گیاهان در تحمل، دفع یا بی‌حرکت‌سازی فلزات سنگین را افزایش دهند و این موضوع در جذب یا سم‌زدایی آن‌ها مؤثر است. قدرت سیستم دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو که فلزات سنگین می‌توانند ایجاد کنند، معمولاً بازتابی از تحمل گیاه به فلزات سنگین است. بنابراین، افزایش بیان ژن‌هایی که مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی را تنظیم می‌کنند، رایج‌ترین روش برای افزایش مقاومت به فلزات سنگین است (Koźmińska et al., 2019). مکانیسم گیاهان تراریخته برای تأثیرگذاری بر فلزات بر اساس ژن‌های بیش‌بیان شده است که در سنتز پروتئین‌ها و پپتیدهایی نقش دارند که فلزات را بی‌حرکت می‌کنند (Singh et al., 2017). هر فلز دارای مکانیزم مولکولی منحصر به فرد برای جذب انتقال و جداسازی است و مهندسی ژنتیک می‌تواند با افزایش تعداد سایت های جذب، کاهش رقابت با سایر یون ها از طریق تغییر خاصیت سایت های جذب و افزایش تعداد سایت های اتصال داخل سلولی که ژن های ناقل فلزات در گیاهان بیش‌اندوز را رمزگذاری می کنند؛ توانایی گیاهان در جذب و جداسازی فلزات سنگین را بهبود دهد (Suman et al., 2018).

۲. افزایش اثربخشی گیاه‌پالایی با استفاده از میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه

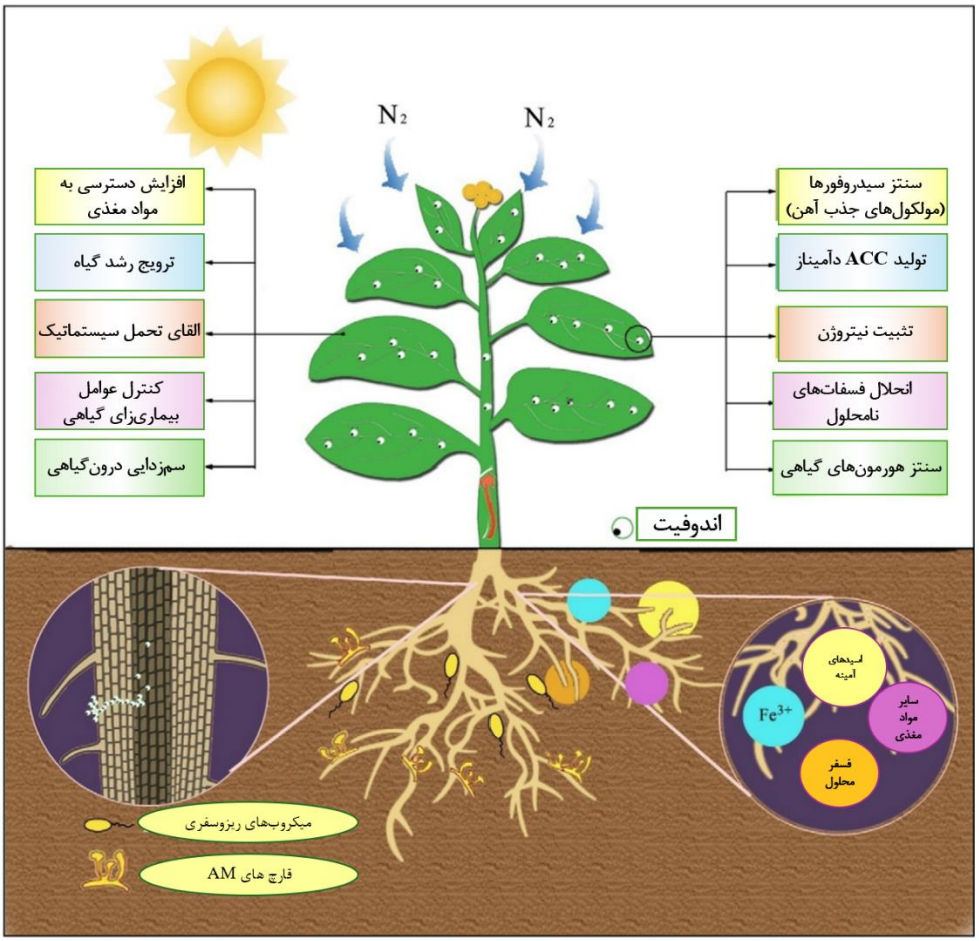
استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه (Plant-Growth-Promoting Bacteria – PGPB) به عنوان یک گزینه مهم و رو به گسترش، برای بهبود تولید زیست‌توده و افزایش تحمل گیاه در برابر فلزات سنگین، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Sobariu et al., 2017; Montalbán et al., 2017). این باکتری‌ها هم‌افزایی قابل‌توجهی با گیاهان برقرار کرده و با کاهش تنش گیاه در محیط آلوده، از رشد آن پشتیبانی می‌کنند (Diaconu et al., 2020). باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPB) شامل گونه‌هایی هستند که اشکال مختلفی از زندگی را در بر می‌گیرند؛ از جمله باکتری‌های آزادزی، ریزوبیوم‌ها که با گیاهان روابط همزیستی اختصاصی برقرار می‌کنند (Rhizobia spp , Frankia spp)، باکتری‌های اندوفیت که قادرند بخشی از بافت‌های داخلی گیاه را کلونیزه کنند، و سیانوباکترها (که پیش‌تر به عنوان جلبک‌های سبز–آبی شناخته می‌شدند) (Glick, 2012). بر اساس ویژگی‌های عملکردی، باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPB) را می‌توان به چهار گروه تقسیم کرد: کودهای زیستی (Biofertilizers): افزایش دسترسی گیاه به مواد مغذی اصلی. محرک‌های رشد (Phytostimulators): تحریک رشد و توسعه گیاه از طریق تولید هورمون‌ها. پالایش کننده‌های ریزوسفر (Rhizoremediator):تجزیه آلاینده‌های آلی و تنظیم انحلال‌پذیری فلزات. آفت‌کش‌های زیستی (Biopesticides): کنترل بیماری‌ها و عوامل بیماری‌زای گیاهی با تولید آنتی‌بیوتیک‌ها و متابولیت‌های ضدقارچی(Novo et al., 2018; Somers et al., 2004). باکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق دو سازوکار مستقیم و غیرمستقیم بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارند. سازوکار مستقیم شامل تسهیل دسترسی به منابع و سنتز هورمون‌های گیاهی است که مستقیماً رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Novo et al., 2018). سازوکار غیرمستقیم شامل کنترل زیستی از طریق تولید ترکیبات ضدتعارض و القای مقاومت سیستمیک می‌باشد (Saraf et al., 2014). برای مثال در سازوکار مستقیم، باکتری‌ها می‌توانند منابع معدنی مورد نیاز گیاه، مانند نیتروژن (N)، فسفر (P) و پتاسیم (K) را که گیاه فاقد آن‌هاست، تأمین کنند (Glick, 2012) و با بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه به استقرار گیاه و افزایش راندمان گیاه پالایی کمک نمایند (Glick, 2012; Hoffman et al., 2014; Goswami et al., 2016; Novo et al., 2018). برخی از میکروارگانیسم‌ها همچنین قادرند Fe^{3+} را به Fe^{2+} تبدیل کنند که به آسانی توسط گیاه جذب شده و نقش اساسی در فرآیندهای متابولیکی مختلف ایفا می‌کند (Manoj et al., 2020). این تبدیل توسط سیدروفورها انجام می‌شود؛ سیدروفورها پروتئین‌هایی هستند که توسط باکتری‌ها سنتز می‌شوند و می‌توانند به طیف وسیعی از فلزات متصل شده و در نتیجه، قابلیت جذب آن‌ها توسط گیاه را

افزایش دهند (Sheoran et al., 2016). باکتری‌ها می‌توانند به‌صورت غیرمستقیم با تولید طیف وسیعی از ترکیبات آنتی‌بیوتیکی که به عنوان آللوشیمیایی شناخته می‌شوند، رشد گیاه را تقویت کنند. این ترکیبات، نقش مهمی در دفاع گیاه در برابر عوامل بیماری‌زا دارند و شامل آنتی‌بیوتیک‌ها، سیانید هیدروژن (HCN)، آنزیم‌های لیتیک و سیدروفورها هستند (Glick, 2012). برای مثال، سیدروفورها، با جلوگیری از دسترسی عوامل بیماری‌زا به آهن و محدود کردن رشد آن‌ها، به کنترل بیولوژیک کمک می‌کنند (Rajkumar et al., 2010). همچنین، برخی از باکتری‌های PGPB با رقابت برای منابع غذایی و کلونیزاسیون ریزوسفر، عوامل بیماری‌زا را از میدان به‌در می‌کنند (Whipps, 2001).

۳. رابطه گیاه-اندوفیت (PGPE) در گیاه‌پالایی

اندوفیت‌ها گروهی از میکروارگانیسم‌های بسیار متنوع هستند که به‌طور فراگیر در بافت‌های داخلی گیاهان وجود دارند (Compat et al., 2016). این میکروارگانیسم‌ها تقریباً در تمامی گونه‌های گیاهی یافت می‌شوند (Wani et al., 2015). پژوهشگران دریافتند که استفاده از PGPR (ریزوباکتری‌های تحریک‌کننده رشد گیاه) PGPE (باکتری‌های اندوفیتیک تحریک‌کننده رشد گیاه) می‌تواند با ترشح آنیون‌ها و پروتون‌های آلی، حل‌شوندگی فلزات را افزایش دهد (Cabello-Conejo et al., 2014; Gill et al., 2021). باکتری‌های اندوفیتی می‌توانند به دو گروه همزیست یا غیرهمزیست تقسیم شوند، به این صورت که گروه اول معمولاً گره‌های ریشه‌ای را کلنی‌زایی می‌کنند و گروه دوم در بافت‌های داخلی گیاه (ریشه، ساقه، برگ) ساکن می‌شوند (Kong & Glick, 2017; Oldroyd et al., 2011). گره‌های ریشه‌ای ساختارهایی هستند که توسط این میکروارگانیسم‌ها و بسته به گونه‌های خاص گیاه و باکتری شکل می‌گیرند (Kong & Glick, 2017). اندوفیت‌ها می‌توانند پیوندهای نزدیکی با گیاهان میزبان خود برقرار کنند که اغلب منجر به تعاملات همزیستی تکامل‌یافته می‌شود و به سود هر دو طرف است. اندوفیت‌ها از گیاهان میزبان خود مواد غذایی غنی و زیستگاهی امن دریافت می‌کنند که آن‌ها را در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده محافظت می‌کند (Reinhold-Hurek & Hurek, 2011; Bacon & Hinton, 2007). در مقابل، اندوفیت‌ها مجموعه‌ای گسترده از ترکیبات زیست‌فعال طبیعی تولید می‌کنند که با سازوکارهای مختلف به رشد و توسعه گیاه کمک می‌کند (Santoyo et al., 2016; Bacon & White, 2016) (شکل ۱). اندوفیت‌ها (PGPE) نسبت به ریزوسفری‌ها (PGPR) از محیطی مساعدتر برخوردار هستند و با رقابت کمتری روبه‌رو می‌شوند، زیرا درون بافت‌های گیاهی زندگی کرده و تعامل نزدیک‌تری با میزبان خود برقرار می‌کنند؛ به همین دلیل اثرات سودمند آن‌ها سریع‌تر ظاهر می‌شود (Kong & Glick, 2017). گونه‌های مختلفی از اندوفیت‌ها مانند Serratia، *Enterobacter*، *Acinetobacter*، *Agrobacterium*، *Bacillus*، *Herbaspirillum* و *Klebsiella* توانایی تولید فیتوهورمون هایی نظیر ایندول-۳-استیک اسید (IAA) (Bisht et al., 2014; Kukla et al., 2014)، سیتوکینین‌ها (CTKs) و جیبرلین‌ها (GAs) را دارند (Waqas et al., 2015). این هورمون‌ها با حفظ تعادل پویا در سطح هورمون‌های گیاه میزبان و تنظیم واکنش‌های گیاه به تنش عمل می‌کنند (Khaksar et al., 2016; A. S. Khan & Liu, 2012). تحت شرایط تنش، اندوفیت‌ها ممکن است رشد گیاه را از طریق تولید آنزیم ۱-آمینوسیکلوپروپان-۱-کربوکسیلات (ACC) دآمیناز نیز تقویت کنند (Glick, 2014). فارغ از مکانیسم‌های مفید ذکر شده در بالا، اندوفیت‌ها همچنین از طریق بهبود جذب مواد مغذی و آب باعث رشد بهتر گیاه می‌شوند و این امر منجر به افزایش مقاومت گیاه و کاهش فعالیت آنزیم‌های تنش اکسیداتیو در گیاهان میزبان در خاک‌های آلوده می‌گردد (Santoyo et al., 2016; Naveed et al., 2014). اندوفیت‌های مفید می‌توانند به‌طور مستقیم وضعیت تغذیه‌ای گیاه میزبان را با تسهیل در جذب مواد مغذی مانند نیتروژن، فسفر و مواد معدنی ضروری بهبود دهند. این امر از طریق تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات‌های غیرآلی، معدنی‌سازی فسفر آلی و تولید سیدروفورها برای جذب آهن صورت می‌گیرد (Behera et al.,2013; Gaiero et al., 2013; Hardoim et al., 2015). شواهد فزاینده‌ای نشان می‌دهد که اندوفیت‌ها می‌توانند به‌طور غیرمستقیم نیز رشد گیاه را تحریک کنند و احتمالاً به‌عنوان

عوامل کنترل بیولوژیک عمل نمایند (Glick, 2012). مکانیسم‌های غیرمستقیم پیشنهادی عمدتاً شامل موارد: تولید متابولیت‌های ضدمیکروبی و آنزیم‌های لیزکننده، القای مقاومت سیستماتیک، رقابت برای مواد مغذی است (Glick, 2015; Robert-Seilaniantz et al., 2011; Zheng et al., 2016). همزیستی‌های میکوریز آربوسکولار (AM) نیز بخش‌های عملکردی و جدایی‌ناپذیر ریشه گیاهان هستند و به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان عامل تقویت‌کننده رشد گیاه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، شناخته می‌شوند. گزارش شده است که این قارچ‌ها در ریشه گیاهانی که در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین رشد می‌کنند حضور دارند و نقش مهمی در تحمل و تجمع فلزات ایفا می‌کنند. قارچ‌های AM در بهبود گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین نقش بالقوه‌ای ایفا می‌کند (Gaur et al., 2004). به‌طور کلی، اندوفیت‌ها نشان داده‌اند که می‌توانند هم‌زمان باعث افزایش جذب مواد مغذی و سرکوب عوامل بیماری‌زای گیاهی در گیاهان میزبان شوند. ویژگی‌های اندوفیت‌ها در ترویج رشد گیاه به گیاهان کمک می‌کند تا با تنش‌های زیستی و غیرزیستی سازگار شوند و در عین حال بیوماس گیاهان مناسب برای گیاه‌پالایی را افزایش دهند (Ijaz et al., 2016; Ryan et al., 2008). زمانی که یک ارتباط گیاه–اندوفیت برقرار شود، این شراکت می‌تواند به توسعه راهبردهای نوین گیاه‌پالایی برای خاک‌های آلوده منجر گردد.



شکل ۱. اندوفیت‌های محرک رشد گیاه و اثرات مثبت آن در گیاه‌پالایی (Feng et al., 2017)

۴. تقویت گیاه‌پالایی با استفاده از عوامل کلات کننده

با به‌کارگیری روش‌های مصنوعی و افزودن عوامل کلات‌کننده (chelating agents)، ظرفیت استخراج فلزات توسط گیاهان افزایش یافته و در نتیجه کارایی فرآیند گیاه‌پالایی به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. مشروط بر اینکه نرخ مصرف عوامل کلات‌کننده به‌خوبی کنترل شود، خطرات زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها نیز قابل پایش و مدیریت خواهد بود (Gavrilescu,

2022). عوامل کلات‌کننده‌ای که به‌طور متداول استفاده می‌شوند شامل اتیلن دی‌آمین دی‌سوکسینیک اسید (EDDS) ، اتیلن دی‌آمین تترااستیک اسید (EDTA) و نیتریلوتری‌استیک اسید (NTA) هستند (Jiang et al., 2019; Tananonchai et al., 2019). این ترکیبات می‌توانند حلالیت فلزات سنگین را افزایش دهند و در نتیجه استخراج فلزات سنگین توسط گیاهان را تسهیل کنند. برای مثال، یکی از شناخته‌شده‌ترین عوامل کمپلکس‌کننده یعنی EDTA، تحرک فلزات سنگین در خاک را به طور جدی فعال می‌کند (Chauhan et al., 2015). طی مطالعه‌ای، افزودن EDTA به‌طور چشمگیری حلالیت ترکیبات حاوی Cd و Pb در خاک را افزایش داد و همچنین جذب Pb ، Zn و Cd در کلزا، ذرت و گندم را بهبود بخشید (Li et al., 2020). افزایش قابلیت دسترسی و استخراج آلاینده‌های فلزی از خاک توسط گیاهانی که با عوامل کلات‌کننده تیمار شده‌اند، می‌تواند به جنبه‌های مختلفی مرتبط باشد، از جمله: ۱) افزایش غلظت فلزات سنگین در محلول خاک، ۲) تقویت حرکت کمپلکس‌های فلز EDTA– به سمت ریشه‌ها، ۳) کاهش اتصال کمپلکس‌های تشکیل‌شده به اجزای با بار منفی دیواره سلولی گیاه، ۴) تخریب موانع فیزیولوژیکی در ریشه‌ها به‌دلیل غلظت بالای کمپلکس‌های حاصل، ۴) افزایش تحرک کمپلکس‌ها در مقایسه با یون‌های آزاد که منجر به جابه‌جایی بیشتر فلزات از ریشه به اندام‌های هوایی می‌شود (Evangelou et al., 2007). این رویکرد، فرایندی جدید در تصفیه لجن فاضلاب‌های شهری و استفاده از آن در کوددهی خاک است. لجن‌ها که دارای مقداری بار فلزات سنگین هستند، از طریق کشت گیاهانی که قادر به استخراج فلزات سنگین می‌باشند به خاک مصنوعی تبدیل می‌شوند. انتخاب گیاهان مناسب برای پالایش و به‌کارگیری روش‌هایی برای بهبود مصنوعی ظرفیت گیاه‌پالایی، عامل کلیدی برای کاهش سریع محتوای فلزات سنگین در خاک مصنوعی است. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که گیاهان علفی سریع‌الرشد مانند فستوک بره نی (*Festuca arundinacea*) و چچم (*Lolium perenne L.*) دارای سیستم ریشه‌ای گسترده بوده و می‌توانند زیست‌توده زیادی تولید کنند. با این حال، ظرفیت گیاه‌پالایی آن‌ها نسبتاً محدود است، اما برای حذف یک فلز سنگین منفرد یا مخلوطی از فلزات سنگین موجود در لجن، قابل‌قبول می‌باشد. استفاده از عوامل کلات‌کننده، کارایی این گیاهان علفی در پالایش لجن فاضلاب را بهبود می‌بخشد (Li et al., 2020a; J. Zhang et al., 2019). در بین مواد کلات کننده، EDTA و هم کمپلکس‌های فلز _EDTA برای گیاهان و جامعه میکروبی خاک بسیار خطرناک هستند(Chen & Cutright, 2001). زیست‌تجزیه پذیری EDTA بسیار پایین است و همچنین باعث افزایش آبشویی فلزات سنگین می‌شود که در نهایت آلودگی آب‌های زیرزمینی را به‌دنبال دارد (Qiao et al., 2017). اتیلن دی‌آمین دی‌سوکسینات (EDDS) به‌طور طبیعی توسط میکروارگانیسم‌ها تولید می‌شود و در افزایش جذب فلزات سنگین مؤثر است (Sidhu et al., 2018). EDDS برای برخی گیاهان سمی است، اما برای میکروارگانیسم‌های خاک سمیت ندارد. اسید نیتریلوتری‌استیک (NTA) یک ماده کلات‌کننده زیست‌تجزیه پذیر است و اثرات فیتوتوکسیک نیز ندارد (Wenger et al., 2003; Freitas et al., 2009).

۵. تقویت گیاه‌پالایی در میدان‌های الکتریکی

پالایش گیاهی دارای برخی محدودیت‌ها است که عمدتاً به عمق کم خاکی مربوط می‌شود که ریشه‌های گیاه می‌توانند بر آلاینده‌ها تأثیر بگذارند (حداکثر ۲۰ سانتی‌متر تا ۱ متر). خاک‌هایی که در عمق با فلزات سنگین آلوده شده‌اند، نمی‌توانند تنها با روش پالایش گیاهی پاک شوند. تحقیقات نشان داده‌اند که فناوری ترکیبی الکتروسینتیک-پالایش گیاهی می‌تواند به رفع این محدودیت کمک کند (Gavrilescu, 2022). تأثیر این روش بر کارایی پالایش قابل توجه است، به ویژه هنگام اعمال جریان الکتریکی (مستمر یا متناوب) با شدت کم، زیرا در این شرایط آلاینده‌ها می‌توانند جابجا شده و به ریشه‌های گیاه منتقل شوند و ظرفیت و شدت پالایش گیاهی را افزایش دهند. همچنین تولید زیست‌توده افزایش می‌یابد، که این امر یا به دلیل افزایش قابلیت زیستی مواد مغذی یا تأثیر جریان الکتریکی بر واکنش‌های آنزیمی، انتقال از طریق غشاها و فعالیت آب است (Cameselle et al., 2019; Mao et al., 2016). طی مطالعه‌ای دو گونه گیاهی که با شرایط خاک و اقلیم منطقه سازگار بودند، انتخاب شدند: *Brassica rapa L.subsp. rapa* و *Lolium perenne L.*. میدان الکتریکی موجب افزایش رشد گیاهان شد، به ویژه در

گونه *L. perenne*، و استخراج گیاهی شش فلز سنگین را بهبود بخشید (Cameselle et al., 2019). علاوه بر این، کشت‌های ترکیبی این دو گونه گیاهی نتایج امیدوارکننده‌ای برای کاربرد در مقیاس بزرگ ارائه کردند. با این حال، اجرای این فرایند ترکیبی نیازمند رعایت مجموعه‌ای از احتیاط‌ها است، زیرا ممکن است رشد گیاهان در نزدیکی الکترودها متوقف شود یا باعث مرگ آن‌ها گردد، چرا که الکترولیز آب می‌تواند رخ دهد و pH اسیدی یا قلیایی ایجاد کند. همچنین، تمرکز فلزات در اطراف ریشه‌های گیاه می‌تواند سطح سمیت را افزایش داده و پیامدهای نامطلوبی بر رشد گیاهان داشته باشد. متأسفانه، منابع علمی اطلاعات کافی برای تعیین شدت بهینه میدان الکتریکی جهت افزایش پالایش گیاهی بدون آسیب رساندن به گیاهان ارائه نمی‌دهند؛ احتمالاً به این دلیل که این پارامتر تا حد زیادی به ویژگی‌های گیاهان، آلاینده‌ها و خاک وابسته است (Gavrilescu, 2022).

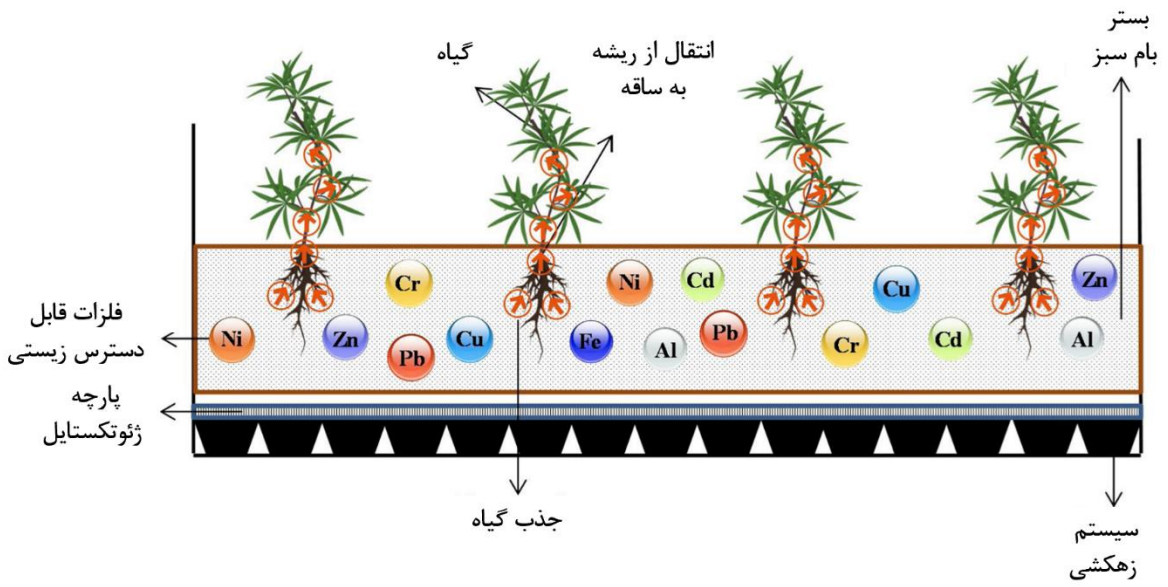
۶. افزایش گیاه‌پالایی با استفاده از اصلاح کننده‌ها

یک روش قدیمی‌تر، که هنوز در پالایش گیاهی مورد توجه و توصیه قرار می‌گیرد، شامل استفاده از افزودنی‌ها (amendments) برای تقویت فرآیند پالایش گیاهی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است، گاهی در حضور میکروارگانیسم‌هایی که رشد گیاه را تحریک می‌کنند (باکتری‌ها و قارچ‌ها). برای این منظور، از مواد آلی یا معدنی مرسوم) مانند کمپوست، نیترات آمونیوم، اسید سیتریک، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2NPs) و غیره (با سطح ویژه بالا و خواص بسیار خوب استفاده می‌شود، که می‌توانند تغییراتی در خاک ایجاد کرده، برخی فلزات سنگین را جذب کرده و گونه‌بندی آن‌ها را تغییر دهند. علاوه بر این، این افزودنی‌ها می‌توانند قابلیت زیستی فلزات سنگین را چه از طریق جذب، چه از طریق تشکیل کمپلکس با مواد هومیک خاک یا رسوب‌دهی تغییر دهند، (Gul et al., 2020; Li et al., 2020). کمپوست فاضلاب شهری یک نمونه از این اصلاح کننده‌ها می‌باشد که حاوی ترکیبات کلات‌کننده طبیعی است که جذب فلزاتی مانند Cd و Ni توسط گیاهانی مانند آفتابگردان (Sunflower) را افزایش می‌دهد (Liphadzi et al., 2006). یک نمونه از چنین افزودنی‌هایی، بیوچار (biochar) است. بیوچار یک ماده جامد پایدار و غنی از کربن است که می‌تواند هزاران سال در خاک باقی بماند. به همین دلیل، از آن برای بهبود خواص فیزیکوشیمیایی خاک و تأمین مواد مغذی برای گیاهان نیز استفاده می‌شود.علاوه بر اینکه بیوچار می‌تواند یون‌های فلزی را از آب موجود در خلل و فرج خاک جذب و نگه دارد، به دلیل سطح منفی بار، طبیعت قلیایی و خواص دیگرش (مانند تأمین مواد مغذی، ظرفیت نگهداری آب و ظرفیت تبادل کاتیونی)، شرایط مساعدی برای رشد ریشه‌های گیاه و میکروارگانیسم‌های مفید در خاک فراهم می‌کند (Sun & Zhou, 2018) .

مزایا و چشم‌اندازهای تجاری گیاه‌پالایی

رویکرد گیاه‌پالایی به‌عنوان یک راه‌حل نوین برای مقابله با آلودگی ناشی از پسماندهای معدنی در حال توسعه است (Hassan et al., 2024). یافتن راهکارهایی برای تقویت رشد گونه‌های بیش‌اندوز در محیط‌های بسیار آلوده، مانند معدن‌های رهاشده که شرایط نامناسبی برای رشد گیاه دارند، ضروری است. یکی دیگر از کاربردهای در حال رشد این روش، شناسایی فرصت‌های تجاری نوین در حوزه‌هایی مانند توسعه بام‌های سبز، استخراج معدنی توسط گیاهان (phytomining) و پروژه‌های زیست‌مهندسی مبتنی بر گیاه است (Islam et al., 2024). بام‌های سبز می‌توانند با جذب و تصفیه آلاینده‌ها، میزان رواناب‌های دارای مواد مغذی و آلاینده را کاهش دهند، زیرا معمولاً از چندین لایه مختلف شامل گیاهان، زیرلایه، پارچه فیلتر، مواد زهکشی، مانع ریشه و عایق تشکیل شده‌اند (Liu et al., 2019; Vijayaraghavan, K., & Joshi., 2014). تحقیقی در این باره تأثیر پوشش گیاهی بر غلظت فلزات سنگین را بررسی کرده و نشان داد که بام‌های سبز دارای پوشش گیاهی در مقایسه با بام‌های سبز بدون گیاه، مقادیر به‌طور قابل‌توجهی کاهش‌یافته‌ای از مس، روی، منیزیم و کادمیوم را در رواناب خود نشان دادند (Park et al., 2022). این کاهش در فلزات سنگین را می‌توان به ظرفیت گیاهان برای جذب، تبدیل و فرار این آلاینده‌ها نسبت داد،

که در نتیجه آن‌ها را به‌طور مؤثر حذف یا در سیستم تثبیت می‌کنند. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، بام‌های دارای پوشش گیاهی و بام‌های بدون پوشش گیاهی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که بام‌های دارای پوشش گیاهی Portulaca (grandiflora)روانابی با کیفیت بالا تولید کرده و دارای غلظت پایین فلزات، هدایت الکتریکی کم و TDS پایین بودند (Vijayaraghavan, K., & Joshi., 2014). شکل ۲، مکانیزم‌های احتمالی گیاه‌پالایی فلزات از بستر آلوده در بام‌های گیاهی را نشان می‌دهد .حرکت یون‌های فلز از ریشه به ساقه توسط فرآیندی به نام انتقال (Translocation) کنترل می‌شود، که شامل تبخیر برگ و فشار ریشه است (Lassat., 2002). برخی از فلزات ممکن است به دلیل موانع فیزیولوژیکی فرضی که انتقال فلزات به بخش‌های بالای گیاه را محدود می‌کنند در ریشه‌ها تجمع یابند؛ در حالی که برخی دیگر بدون مشکل قابل انتقال هستند. احیای سایت‌های آلوده با استفاده از محصولات زراعی مناسب و دارای ارزش اقتصادی یک استراتژی پویا محسوب می‌شود، زیرا می‌تواند مزایای اضافی در قالب محصولات گیاهی (Phytoproducts) مانند روغن‌های معطر، زیست‌توده برای تولید کاغذ و خمیر کاغذ، بیوچار، انرژی و بیودیزل، محصولات کشاورزی غنی‌شده (Biofortified Crops)، گیاهان زینتی یا محصولات چوبی متنوع فراهم کند (Pandey et al., 2019).



شکل ۲. استخراج گیاهی فلزات از بستر آلوده در بام‌های گیاهی (Kuppusamy et al., 2018)

نتیجه گیری

گیاه‌پالایی به‌عنوان یک فناوری نوین، سازگار با محیط زیست، کم‌هزینه و کارآمد، جایگزینی مناسب برای روش‌های شیمیایی یا فیزیکوشیمیایی در حذف آلاینده‌ها، به ویژه فلزات سنگین از محیط‌زیست محسوب می‌شود. گیاهان از طریق جذب مستقیم فلزات سنگین توسط ریشه‌ها، تثبیت آلاینده‌ها در خاک و جلوگیری از انتشار آن‌ها، نقش مؤثری در کاهش آلودگی ایفا می‌کنند.استفاده از فناوری‌های نوین، شامل مهندسی ژنتیک، عوامل کلات‌کننده و میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه (PGPR و PGPE) می‌تواند کارایی گیاه‌پالایی فلزات سنگین را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد و محدودیت‌های طبیعی گیاهان را کاهش دهد. با وجود چالش‌هایی همچون طولانی بودن فرآیند، حساسیت به شرایط محیطی و محدودیت‌های گونه‌های گیاهی موجود، توسعه رویکردهای ترکیبی و یکپارچه، از جمله استفاده همزمان از گیاهان، میکروب‌ها، ترکیبات شیمیایی یا جریان‌های الکتریکی می‌تواند عملکرد سیستم‌های گیاه‌پالایی را بهبود بخشیده و امکان کاربرد آن در مقیاس‌های بزرگ را فراهم کند. چشم‌اندازهای اقتصادی و زیست‌محیطی گیاه‌پالایی، از جمله توسعه بام‌های سبز، استخراج معدنی توسط گیاهان

(phytomining)، تصفیه آب و خاک آلوده و بهبود کیفیت محیط‌های شهری و صنعتی، نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار آینده‌دار و پایدار در مدیریت آلودگی‌های محیط‌زیستی نقش مهمی ایفا کند.

A Review of Novel Technologies for improving the Phytoremediation of Soil Heavy Metals

Farnaz Fazli [1], Shayan Shariati [2*]

1- M.Sc. Student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Corresponding Author, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: shayan_shariati@ut.ac.ir

Abstract:

Phytoremediation is a general term that refers to the use of plants to extract, reduce, transform, or stabilize organic and inorganic pollutants present in soil, sediments, and groundwater. As a novel and sustainable approach to mitigating environmental pollution, this method encompasses a wide range of processes and mechanisms. Advanced technologies applied to enhance the efficiency of phytoremediation, such as the use of chelating agents, genetic engineering, and plant growth-promoting microorganisms (PGPR), significantly improve the effectiveness of phytoremediation in removing various pollutants, particularly heavy metals. Overall, phytoremediation represents a sustainable and cost-effective approach to environmental pollution management, which, when combined with modern technologies, opens new horizons for practical applications. In addition to its role in pollutant removal, this technology is expanding through the creation of novel commercial opportunities, offering promising prospects in both environmental and economic domains.

Keywords: Bioremediation, Eco-friendly, Phytoremediation, Soil Pollution.

فهرست منابع

Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., Sebastian, A., Baum, C., Prasad, M. N. V., Wenzel, W. W., & Rinklebe, J. (2017). Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation–A review. *Earth-Science Reviews*, *171*, 621–645. https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2017.06.005

Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S., & Asghar, H. N. (2019a). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *174*, 714–727. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2019.02.068

Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S., & Asghar, H. N. (2019b). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *174*, 714–727. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2019.02.068

Bacon, C. W., & Hinton, D. M. (2007). Bacterial endophytes: The endophytic niche, its occupants, and its utility. In S. S. Gnanamanickam (Ed.), *Plant-associated bacteria* (pp. xx–xx). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4538-7_5

Bacon, C. W., & White, J. F. (2016). Functions, mechanisms, and regulation of endophytic and epiphytic microbial communities of plants. *Symbiosis*, *68*(1), 87–98. https://doi.org/10.1007/s13199-015-0350-2

Behera, Bikash & Singdevsachan, S.K. & Mishra, Rashmi & Dutta, S.K. & Thatoi, Hrudayanath. (2013). Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove—A review. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 3. 10.1016/j.bcab.2013.09.008.

Bisht, S., Pandey, P., Kaur, G., Aggarwal, H., Sood, A., Sharma, S., Kumar, V., & Bisht, N. S. (2014). Utilization of endophytic strain Bacillus sp. SBER3 for biodegradation of polyaromatic hydrocarbons (PAH) in soil model system. *European Journal of Soil Biology*, *60*, 67–76. https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2013.10.009

Cabello-Conejo, M. & Becerra-Castro, Cristina & Prieto-Fernandez, Angeles & Monterroso, Carmela & Saavedra-Ferro, A. & Mench, Michel & Kidd, Petra. (2014). Rhizobacterial inoculants can improve nickel phytoextraction by the hyperaccumulator Alyssum pintodasilvae. Plant and Soil. 379. 10.1007/s11104-014-2043-7.

Cameselle, C., Gouveia, S., & Urréjola, S. (2019). Benefits of phytoremediation amended with DC electric field. Application to soils contaminated with heavy metals. *Chemosphere*, *229*, 481–488. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.04.222

Chauhan, Garima & Pant, K.K. & Nigam, K.D.P.. (2015). Chelation Technology: A Promising Green Approach for Resource Management and Waste Minimization.. Environmental Science Processes & Impacts. 17. 12-40. 10.1039/c4em00559g.

Chen, H., & Cutright, T. (2001). EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr, and Ni uptake by Helianthus annuus. *Chemosphere*, *45*(1), 21–28. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00031-5

Compant, S., Saikkonen, K., Mitter, B., Campisano, A., Lemoine, M., & Sessitsch, A. (2016). Editorial special issue: Soil, plants and endophytes. *Plant and Soil*, *405*(1), 1–11. https://doi.org/10.1007/s11104-016-2927-9

Diaconu, M., Pavel, L. V., Hlihor, R. M., Rosca, M., Fertu, D. I., Lenz, M., Corvini, P. X., & Gavrilescu, M. (2020). Characterization of heavy metal toxicity in some plants and microorganisms—A preliminary approach for environmental bioremediation. *New Biotechnology*, *56*, 130–139. https://doi.org/10.1016/J.NBT.2020.01.003

Evangelou, M. W. H., Ebel, M., & Schaeffer, A. (2007). Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere*, *68*(6), 989–1003. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2007.01.062

Feng, N. X., Yu, J., Zhao, H. M., Cheng, Y. T., Mo, C. H., Cai, Q. Y., Li, Y. W., Li, H., & Wong, M. H. (2017). Efficient phytoremediation of organic contaminants in soils using plant-endophyte partnerships. *The Science of the total environment*, *583*, 352–368. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.075

Freitas, E., Nascimento, C., & Silva, A. (2009). The use of NTA and EDTA for lead phytoextraction from soil from a battery recycling site.

Gaiero, J. R., McCall, C. A., Thompson, K. A., Day, N. J., Best, A. S., & Dunfield, K. E. (2013). Inside the root microbiome: bacterial root endophytes and plant growth promotion. American journal of botany, 100(9), 1738–1750. https://doi.org/10.3732/ajb.1200572

Gaur, Atimanav & Adholeya, Alok. (2004). Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Current Science. 86.

Gavrilescu, M. (2022). Enhancing phytoremediation of soils polluted with heavy metals. *Current Opinion in Biotechnology*, *74*, 21–31. https://doi.org/10.1016/J.COPBIO.2021.10.024

Gill, R. A., Ahmar, S., Ali, B., Saleem, M. H., Khan, M. U., Zhou, W., & Liu, S. (2021). The Role of Membrane Transporters in Plant Growth and Development, and Abiotic Stress Tolerance. *International journal of molecular sciences*, *22*(23), 12792. https://doi.org/10.3390/ijms222312792

Glick B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, *2012*, 963401. https://doi.org/10.6064/2012/963401

Glick B. R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological research*, *169*(1), 30–39. https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009

Glick, B.R. (2015). Phytoremediation. In: Beneficial Plant-Bacterial Interactions. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13921-0_7

Gomes da Silva, F.J., Gouveia, R.M. (2020). Global Population Growth and Industrial Impact on the Environment. In: Cleaner Production. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23165-1_3

Goswami, D., Thakker, J. N., & Dhandhukia, P. C. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food & Agriculture*, *2*(1). https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1127500

Gul, I., Manzoor, M., Kallerhoff, J., & Arshad, M. (2020). Enhanced phytoremediation of lead by soil applied organic and inorganic amendments: Pb phytoavailability, accumulation and metal recovery. *Chemosphere*, *258*, 127405. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.127405

Hardoim, P. R., van Overbeek, L. S., Berg, G., Pirttilä, A. M., Compant, S., Campisano, A., Döring, M., & Sessitsch, A. (2015). The Hidden World within Plants: Ecological and Evolutionary Considerations for Defining Functioning of Microbial Endophytes. *Microbiology and molecular biology reviews : MMBR*, *79*(3), 293–320. https://doi.org/10.1128/MMBR.00050-14

Hassan, S., Bhadwal, S. S., Khan, M., Sabreena, Nissa, K. U., Shah, R. A., Bhat, H. M., Bhat, S. A., Lone, I. M., & Ganai, B. A. (2024). Revitalizing contaminated lands: A state-of-the-art review on the remediation of mine-tailings using phytoremediation and genomic approaches. *Chemosphere*, *356*, 141889. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141889

Hembrom, S., Singh, B., Gupta, S. K., & Nema, A. K. (2020). A comprehensive evaluation of heavy metal contamination in foodstuff and associated human health risk: A global perspective. In P. Singh, R. Singh, & V. Srivastava (Eds.), *Contemporary environmental issues and challenges in era of climate change* (pp. xx–xx). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9595-7_2

Hoffman, B. M., Lukoyanov, D., Yang, Z. Y., Dean, D. R., & Seefeldt, L. C. (2014). Mechanism of nitrogen fixation by nitrogenase: the next stage. *Chemical reviews*, *114*(8), 4041–4062. https://doi.org/10.1021/cr400641x

Ijaz, A., Imran, A., Anwar ul Haq, M., Shahid, M., & Khan, Q. (2016). Phytoremediation: Recent advances in plant–endophytic synergistic interactions. *Plant and Soil*, *405*(1-2), 179–195. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2606-2

Islam, Md & Saxena, Neha & Sharma, Deepa. (2024). Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review. RSC Sustainability. 2. 1269-1288. 10.1039/D3SU00440F.

Jiang, M., Liu, S., Li, Y., Li, X., Luo, Z., Song, H., & Chen, Q. (2019). EDTA-facilitated toxic tolerance, absorption and translocation and phytoremediation of lead by dwarf bamboos. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *170*, 502–512. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2018.12.020

Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, *8*, 100203. https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2022.100203

Kazemalilou, S., Delangiz, N., Asgari Lajayer, B., & Ghorbanpour, M. (2020). Insight into plant-bacteria-fungi interactions to improve plant performance via remediation of heavy metals: An overview. In *Book Title* (pp. xx–xx). Publisher. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818469-1.00010-9

Khaksar, G., Treesubsuntorn, C., & Thiravetyan, P. (2016). Effect of endophytic Bacillus cereus ERBP inoculation into non-native host: Potentials and challenges for airborne formaldehyde removal. *Plant Physiology and Biochemistry*, *107*, 326–336. https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2016.06.020

Khan, A. S., & Liu, H. (2012). Variable strain rate sensitivity in an aluminum alloy: Response and constitutive modeling. *International Journal of Plasticity*, *36*, 1–14. https://doi.org/10.1016/J.IJPLAS.2012.02.001

Kong, Z., & Glick, B. R. (2017). The Role of Plant Growth-Promoting Bacteria in Metal Phytoremediation. *Advances in Microbial Physiology*, *71*, 97–132. https://doi.org/10.1016/BS.AMPBS.2017.04.001

Koźmińska, Aleksandra & Wiszniewska, Alina & Hanus-Fajerska, Ewa & Boscaiu, Monica & Al Hassan, Mohamad & Halecki, Wiktor & Vicente, Oscar. (2019). Identification of Salt and Drought Biochemical Stress Markers in Several Silene vulgaris Populations. Sustainability. 11. 10.3390/su11030800.

Kukla, M., Płociniczak, T., & Piotrowska-Seget, Z. (2014). Diversity of endophytic bacteria in Lolium perenne and their potential to degrade petroleum hydrocarbons and promote plant growth. *Chemosphere*, *117*(1), 40–46. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2014.05.055

Kuppusamy, Vijayaraghavan & Reddy, D. Harikishore & Yun, Yeoung-Sang. (2018). Improving the quality of runoff from green roofs through synergistic biosorption and phytoremediation techniques: A review. Sustainable Cities and Society. 46. 10.1016/j.scs.2018.12.009.

Lasat M. M. (2002). Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *Journal of environmental quality*, *31*(1), 109–120.

Lee, Y.-Y., Cho, K.-S., & Yun, J. (2025). Phytoremediaton Strategies for Co-Contaminated Soils: Overcoming Challenges, Enhancing Efficiency, and Exploring Future Advancements and Innovations. *Processes*, *13*(1), 132. https://doi.org/10.3390/pr13010132

Li, F. li, Qiu, Y., Xu, X., Yang, F., Wang, Z., Feng, J., & Wang, J. (2020). EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals from sludge soil by Italian ryegrass (Lolium perenne L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *191*, 110185. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.110185

Liphadzi, M. S., & Kirkham, M. B. (2006). Chelate-Assisted Heavy Metal Removal by Sunflower to Improve Soil with Sludge. *Journal of Crop Improvement*, *16*(1–2), 153–172. https://doi.org/10.1300/J411v16n01_11

Liu, S., Yang, B., Liang, Y., et al. (2020). Prospect of phytoremediation combined with other approaches for remediation of heavy metal-polluted soils. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 16069–16085. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08282-6

Liu, W., Wei, W., Chen, W., Deo, R. C., Si, J., Xi, H., ... & Feng, Q. (2019). The impacts of substrate and vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs. *Journal of hydrology*, *576*, 575-582.

Manoj, S. R., Karthik, C., Kadirvelu, K., Arulselvi, P. I., Shanmugasundaram, T., Bruno, B., & Rajkumar, M. (2020). Understanding the molecular mechanisms for the enhanced phytoremediation of heavy metals through plant growth promoting rhizobacteria: A review. *Journal of Environmental Management*, *254*, 109779. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.109779

Mao, X., Han, F. X., Shao, X., Guo, K., McComb, J., Arslan, Z., & Zhang, Z. (2016). Electro-kinetic remediation coupled with phytoremediation to remove lead, arsenic and cesium from contaminated paddy soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *125*, 16–24. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2015.11.021

Montalbán, B., Thijs, S., Lobo, M. C., Weyens, N., Ameloot, M., Vangronsveld, J., & Pérez-Sanz, A. (2017). Cultivar and Metal-Specific Effects of Endophytic Bacteria in *Helianthus tuberosus* Exposed to Cd and Zn. *International Journal of Molecular Sciences*, *18*(10), 2026. https://doi.org/10.3390/ijms18102026

Naveed, Muhammad & Mitter, Birgit & Reichenauer, Thomas & Wieczorek, Krzysztof & Sessitsch, Angela. (2014). Increased drought stress resilience of maize through endophytic colonization by Burkholderia phytofirmans PsJN and Enterobacter sp. FD17. Environmental and Experimental Botany. 97. 30–39. 10.1016/j.envexpbot.2013.09.014.

Novo, L. A. B., Castro, P. M. L., Alvarenga, P., & da Silva, E. F. (2018). Plant Growth–Promoting Rhizobacteria-Assisted Phytoremediation of Mine Soils. *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*, 281–295. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00016-6

Oladoye, P. O., Olowe, O. M., & Asemoloye, M. D. (2022). Phytoremediation technology and food security impacts of heavy metal contaminated soils: A review of literature. *Chemosphere*, *288*, 132555. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132555

Oldroyd, G. E., Murray, J. D., Poole, P. S., & Downie, J. A. (2011). The rules of engagement in the legume-rhizobial symbiosis. *Annual review of genetics*, *45*, 119–144. https://doi.org/10.1146/annurev-genet-110410-132549

Oubohssaine, M., & Dahmani, I. (2024). Phytoremediation: Harnessing plant power and innovative technologies for effective soil remediation. In *Plant Stress* (Vol. 14). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100578

Pandey, Vimal & Souza-Alonso, Pablo. (2019). Market Opportunities: in Sustainable Phytoremediation. 10.1016/B978-0-12-813912-7.00002-8.

Park, S.-Y., Oh, D.-K., Lee, S.-Y., Yeum, K.-J., Yoon, Y.-H., & Ju, J.-H. (2022). Combined Effects of Substrate Depth and Vegetation of Green Roofs on Runoff and Phytoremediation under Heavy Rain. *Water*, *14*(18), 2792. https://doi.org/10.3390/w14182792

Priya, A. K., Muruganandam, M., Ali, S. S., & Kornaros, M. (2023). Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach. *Toxics*, *11*(5), 422. https://doi.org/10.3390/toxics11050422

Qiao, J., Sun, H., Luo, X., Zhang, W., Mathews, S., & Yin, X. (2017). EDTA-assisted leaching of Pb and Cd from contaminated soil. *Chemosphere*, *167*, 422–428. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2016.10.034

Rajkumar, M., Ae, N., Prasad, M. N. V., & Freitas, H. (2010). Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. *Trends in Biotechnology*, *28*(3), 142–149. https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2009.12.002

Reinhold-Hurek, B., & Hurek, T. (2011). Living inside plants: bacterial endophytes. *Current Opinion in Plant Biology*, *14*(4), 435–443. https://doi.org/10.1016/J.PBI.2011.04.004

Robert-Seilaniantz, A., Grant, M., & Jones, J. D. (2011). Hormone crosstalk in plant disease and defense: more than just jasmonate-salicylate antagonism. *Annual review of phytopathology*, *49*, 317–343. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114447

Ryan, R. P., Germaine, K., Franks, A., Ryan, D. J., & Dowling, D. N. (2008). Bacterial endophytes: Recent developments and applications. *FEMS Microbiology Letters*, *278*(1), 1–9. https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00918.x

Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., del Carmen Orozco-Mosqueda, M., & Glick, B. R. (2016). Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research*, *183*, 92–99. https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2015.11.008

Saraf, M., Pandya, U., & Thakkar, A. (2014). Role of allelochemicals in plant growth promoting rhizobacteria for biocontrol of phytopathogens. *Microbiological Research*, *169*(1), 18–29. https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2013.08.009

Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., Rehim, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, *171*, 710–721. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116

Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2016). Factors Affecting Phytoextraction: A Review. *Pedosphere*, *26*(2), 148–166. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60032-7

Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2018). Ethylenediamine disuccinic acid enhanced phytoextraction of nickel from contaminated soils using Coronopus didymus (L.) Sm. *Chemosphere*, *205*, 234–243. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.04.106

Singh, S. P., Keller, B., Gruissem, W., & Bhullar, N. K. (2017). Rice NICOTIANAMINE SYNTHASE 2 expression improves dietary iron and zinc levels in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, *130*(2), 283-292.

Singh, S., Fulzele, D. P., & Kaushik, C. P. (2016). Potential of Vetiveria zizanoides L. Nash for phytoremediation of plutonium (239Pu): Chelate assisted uptake and translocation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *132*, 140–144. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2016.05.006

Sobariu, D. L., Fertu, D. I. T., Diaconu, M., Pavel, L. V., Hlihor, R. M., Drăgoi, E. N., Curteanu, S., Lenz, M., Corvini, P. F. X., & Gavrilescu, M. (2017). Rhizobacteria and plant symbiosis in heavy metal uptake and its implications for soil bioremediation. *New Biotechnology*, *39*, 125–134. https://doi.org/10.1016/J.NBT.2016.09.002

Somers, E., Vanderleyden, J., & Srinivasan, M. (2004). Rhizosphere Bacterial Signalling: A Love Parade Beneath Our Feet. *Critical Reviews in Microbiology*, *30*(4), 205–240. https://doi.org/10.1080/10408410490468786

Suman, J., Uhlik, O., Viktorova, J., & Macek, T. (2018). Phytoextraction of Heavy Metals: A Promising Tool for Clean-Up of Polluted Environment?. *Frontiers in plant science*, *9*, 1476. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01476

Sun, c., & zhou, x. (2018). Imperfect competition in china's import market of roundwood and lumber products. Journal of agricultural and applied economics, 50(2), 149–168. Doi:10.1017/aae.2017.31

Tananonchai, A., Sampanpanish, P., Chanpiwat, P., et al. (2019). Effect of EDTA and NTA on cadmium distribution and translocation in Pennisetum purpureum Schum cv. Mott. Environmental Science and Pollution Research, 26, 9851–9860. https://doi.org/10.1007/s11356-018-04103-z

Vijayaraghavan, K., & Joshi, U. M. (2014). Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environmental Pollution*, *194*, 121-129.

Wang, B., Xie, H. L., Ren, H. Y., Li, X., Chen, L., & Wu, B. C. (2019). Application of AHP, TOPSIS, and TFNs to plant selection for phytoremediation of petroleum-contaminated soils in shale gas and oil fields. *Journal of Cleaner Production*, *233*, 13–22. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.301

Wani, Z. A., Ashraf, N., Mohiuddin, T., & Khan, M. A. (2015). Plant–endophyte symbiosis, an ecological perspective. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *99*(7), 2955–2965. https://doi.org/10.1007/s00253-015-6487-3

Waqas, M., Khan, A. L., Hamayun, M., Shahzad, R., Kang, S.-M., & Lee, I.-J. (2015). Endophytic infection alleviates biotic stress in sunflower through regulation of defence hormones, antioxidants, and functional amino acids. *European Journal of Plant Pathology*, *141*(4), 803–824. https://doi.org/10.1007/s10658-014-0581-8

Wenger, K., Gupta, S. K., Furrer, G., & Schulin, R. (2003). The role of nitrilotriacetate in copper uptake by tobacco. Journal of environmental quality, 32(5), 1669–1676. https://doi.org/10.2134/jeq2003.1669

Whipps, J. M. (2001). Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, *52*(suppl_1), 487–511. https://doi.org/10.1093/jexbot/52.suppl_1.487

Wu, G., Kang, H., Zhang, X., Shao, H., Chu, L., & Ruan, C. (2010). A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities. *Journal of Hazardous Materials*, *174*(1–3), 1–8. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.09.113

Zhang, J., Yang, N., Geng, Y., Zhou, J., & Lei, J. (2019). Effects of the combined pollution of cadmium, lead and zinc on the phytoextraction efficiency of ryegrass (: Lolium perenne L.). *RSC Advances*, *9*(36), 20603–20611. https://doi.org/10.1039/c9ra01986c

Zheng, Y. K., Qiao, X. G., Miao, C. P., & et al. (2016). Diversity, distribution and biotechnological potential of endophytic fungi. *Annals of Microbiology*, *66*, 529–542. https://doi.org/10.1007/s13213-015-1153-7