



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

باکتری‌های ریزوسفری با عملکرد دوگانه در زیست‌پالایی رادیونوکلئیدها: چشم‌اندازها، چالش‌ها و مسیر پیش‌رو

محمدجواد احمدی^{۱,*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی گیاه‌پزشکی، دانشگاه محقق اردبیلی، Mohamadjavadahhmadi79@gmail.com

خلاصه

زیست‌پالایی رادیونوکلئیدها با استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) به‌عنوان رویکردی پایدار و زیست‌سازگار برای کاهش آلودگی پرتوزا مطرح شده‌است، اما شواهد تجربی اندکی از عملکرد هم‌زمان این باکتری‌ها در پاکسازی آلاینده و تقویت رشد گیاه در شرایط پرتوزا وجود دارد. این مقاله با رویکردی تحلیلی و انتقادی، شواهد موجود درباره قابلیت‌های PGPR را مرور کرده و نشان می‌دهد که اگرچه مکانیسم‌هایی مانند تولید سیدروفور، ترشح اسید آلی و تشکیل بیوفیلم در فیتوپالایی فلزات سنگین موفق عمل کرده‌اند، اما تعمیم مستقیم آن‌ها به رادیونوکلئیدها بدون اعتبارسنجی تجربی ممکن نیست. مقاله سه مانع کلیدی را برجسته می‌سازد: اثرات ژنوتوکسیک و اکسیداتیو تشعشع بر بقاء میکروبی، فقدان مقاومت پرتوزاپالا در بیشتر سویه‌های رایج PGPR، و کمبود داده‌های میدانی بلندمدت در مورد پایداری عملکرد آن‌ها در ریزوسفر پرتوزا. همچنین، مسئله مدیریت زیست‌توده آلوده پس از پاکسازی به‌عنوان چالش اغلب نادیده‌گرفته‌شده مورد تأکید قرار گرفته است. در پایان، مقاله با تأکید بر ضرورت طراحی چارچوب مفهومی جدید و مدل‌های تجربی قوی برای اعتبارسنجی عملکرد دوگانه، مسیر تحقیقات آینده را ترسیم می‌کند و پایه‌ای برای توسعه مدل‌های یکپارچه گیاه-میکروب در زیست‌پالایی پرتوزا فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی: زیست‌پالایی، رادیونوکلئید، باکتری‌های محرک رشد گیاه، PGPR، پرتوزایی، فیتوپالایی، تشکیل بیوفیلم، مقاومت پرتوزاپالا، تعامل گیاه-میکروب، مهندسی میکروبی، مدیریت زیست‌توده، ریزوسفر پرتوزا



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

۱. مقدمه

آلودگی‌های ناشی از رادیونوکلئیدها، به‌ویژه آن‌هایی که از فعالیت‌های هسته‌ای، عملیات معدن‌کاری و فرآیندهای صنعتی سرچشمه می‌گیرند، از جمله معضلات زیست‌محیطی حاد و ماندگار به‌شمار می‌آیند که پیامدهای بالقوه‌ای برای سلامت انسان و پایداری اکوسیستم‌ها دارند. این عناصر پرتوزا، به‌دلیل ماهیت تجزیه‌ناپذیر و توانایی در نشر پایدار پرتوهای یونیزان، مخاطراتی پیچیده و بلندمدت ایجاد می‌کنند که مهار آن‌ها مستلزم بهره‌گیری از راهکارهایی نوین، ایمن و پایدار است. در این راستا، زیست‌پالایی به‌عنوان رویکردی مبتنی بر توانایی‌های طبیعی میکروارگانیسم‌ها، گیاهان و قارچ‌ها، جایگاهی برجسته یافته و به‌عنوان جایگزینی مؤثر برای روش‌های مرسوم فیزیکی و شیمیایی مطرح شده‌است؛ روش‌هایی که اغلب هزینه‌بر بوده و با تخریب‌های زیست‌محیطی همراه هستند. [۱، ۲]

میکروارگانیسم‌ها، به‌ویژه باکتری‌ها، به‌دلیل سازگاری زیستی بالا، سهولت کشت در شرایط آزمایشگاهی و برخورداری از توانمندی‌های ذاتی در تبدیل، تثبیت و حذف رادیونوکلئیدها، از اجزای کلیدی در راهبردهای زیست‌پالایی به‌شمار می‌روند. این میکروارگانیسم‌ها از طریق مکانیسم‌هایی همچون بیوکاهش، جذب و انباشت زیستی، و کانی‌سازی زیستی قادرند اشکال مختلف رادیونوکلئیدها را به ترکیبات کم‌خطر یا کم‌خطر تبدیل کنند. در موازات این فرایند، فیتوپالایی به‌عنوان رویکردی مبتنی بر بهره‌گیری از گیاهان برای جذب، انتقال یا تثبیت آلاینده‌ها، مزایایی چون حفظ یکپارچگی ساختار خاک و قابلیت اجرای وسیع در نواحی با سطح آلودگی کم تا متوسط را فراهم می‌آورد. هم‌کنشی میان گیاه و میکروب در این سامانه‌های ترکیبی، از طریق افزایش فراهمی زیستی آلاینده‌ها و ارتقای مقاومت به تنش‌های محیطی، به‌طور مؤثری کارایی پالایش زیستی را بهبود بخشیده و سرعت آن را افزایش می‌دهد. [۱-۴]

مفهوم باکتری‌های دوکاره، که قادر به انجام همزمان پالایش زیستی رادیونوکلئیدها و تحریک رشد گیاه (PGPR) هستند، در این زمینه اهمیت زیادی دارد. این باکتری‌ها نه‌تنها به انجام دو عملکرد مجزا می‌پردازند، بلکه با همکاری هم، تاب‌آوری اکوسیستم و پایداری فرآیندهای زیستی را تقویت می‌کنند. در شرایط محیطی پرتوزا و دشوار، ویژگی‌های محرک رشد گیاه، نظیر توانایی حل‌کنندگی مواد مغذی، افزایش مقاومت به تنش‌های اکسیداتیو و بهبود رشد ریشه، به‌طور مؤثری با چالش‌های ناشی از تشعشعات و کمبود عناصر غذایی مقابله می‌کنند و از این طریق، بقا و شادابی سیستم گیاه-میکروب را حفظ می‌نمایند. [۵-۷]

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه زیست‌پالایی، همچنان چالش‌های متعددی عملکرد این فرآیند را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. از جمله این موانع می‌توان به اثرات هم‌افزا یا متقابل فلزات سنگین، حضور یون‌های رقابتی، و پیچیدگی‌های موجود در شرایط ژئوشیمیایی و هیدروژئولوژیکی محیط اشاره کرد که بر کارایی میکروارگانیسم‌ها و گیاهان در محیط‌های آلوده تأثیرگذارند. در این راستا، انجام تحقیقات هدفمند با تمرکز بر بومی‌سازی میکروب‌های کارآمد در سایت‌های آلوده و توسعه مدل‌های مفهومی سایت (CSM) برای شناسایی ظرفیت بالقوه پالایش، گامی اساسی در بهبود کارایی این فناوری است. افزون بر این، به‌کارگیری مدل‌سازی‌های ریاضی برای پیش‌بینی رفتار سامانه زیست‌پالایی و بهینه‌سازی آن در شرایط میدانی، به‌عنوان بخش جدایی‌ناپذیر از رویکردهای نوین در این حوزه مطرح است و نقشی کلیدی در طراحی دقیق و اجرای مؤثر پروژه‌های پالایشی ایفا می‌کند. [۲، ۸، ۹]



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

هدف این مقاله، ارائه چارچوبی جامع و مبتنی بر شواهد برای شناسایی و به‌کارگیری باکتری‌های دوکاره در زیست‌پالایی آلاینده‌های پرتوزا است؛ چارچوبی که با تلفیق استراتژی‌های میکروبی و گیاهی، تاب‌آوری اکوسیستم و پایداری فرایند پالایش را افزایش داده و راه را برای تحقیقات آینده در این زمینه هموار می‌سازد.

۲. میکروارگانیسم‌ها در زیست‌پالایی رادیونوکلیئیدها و سازوکارهای آنها

میکروارگانیسم‌ها در زیست‌پالایی رادیونوکلیئیدها نقش محوری ایفا می‌کنند و از طریق مکانیسم‌های متنوعی، این آلاینده‌های پرتوزا را به اشکال غیرسمی، پایدار یا تثبیت‌شده تبدیل می‌کنند. این فرآیندها شامل بیوکاهش، جذب زیستی، انباشت زیستی، کانی‌سازی و سایر واکنش‌های بیوشیمیایی پیچیده است که به‌طور مؤثر به کاهش سمیت و حرکت رادیونوکلیئیدها در محیط‌های خاک و آب کمک می‌کند. از سوی دیگر، تحمل تشعشع به‌عنوان یک ویژگی کلیدی، نه‌تنها در بقای میکروارگانیسم‌ها در شرایط سخت و پرتوزا، بلکه در حفظ کارایی آنها در انجام فرایندهای زیست‌پالایی اهمیت دارد. در واقع، توانایی مقابله با آسیب‌های ناشی از تشعشعات یونیزه‌کننده، زیست‌پالایی مؤثر را ممکن ساخته و به بهبود پایداری اکوسیستم‌های آلوده کمک می‌کند. در این بخش، به بررسی جامع این مکانیسم‌ها و تأثیر حیاتی تحمل تشعشع بر عملکرد میکروبی پرداخته می‌شود تا بستر علمی لازم برای درک دقیق‌تر چالش‌ها و فرصت‌های زیست‌پالایی رادیونوکلیئیدها فراهم آید. [۱، ۱۰، ۱۱]

۲.۱. مکانیسم‌های متنوع زیست‌پالایی رادیونوکلیئیدها

محیط‌های آلوده به رادیونوکلیئیدها اغلب زیستگاه گونه‌های میکروبی ویژه‌ای هستند که در نتیجه‌ی سازگاری تدریجی با شرایط پرتوزا، توان تحمل بالایی نسبت به این آلاینده‌ها کسب کرده‌اند. این میکروارگانیسم‌ها با بهره‌گیری از طیف گسترده‌ای از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی و بیوشیمیایی، قادر به تعامل، تثبیت و دگرگونی رادیونوکلیئیدها هستند؛ فرآیندهایی که به‌طور مؤثری موجب کاهش تحرک، سمیت و زیست‌دسترسی این ترکیبات در محیط‌های خاکی و آبی می‌شوند. [۱۲]

جذب سطحی (Biosorption) فرایندی غیرفعال و مستقل از فعالیت‌های متابولیک سلول است که طی آن رادیونوکلیئیدها از طریق برهم‌کنش‌هایی نظیر جذب فیزیکی و تبادل یونی، به گروه‌های عاملی شیمیایی موجود در سطح سلول، از جمله کربوکسیل، آمین، هیدروکسیل، فسفات و سولفیدریل متصل می‌شوند. کارایی این فرآیند به‌شدت تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد؛ از جمله وضعیت زیستی زیست‌توده (زنده یا غیرزنده)، ترکیب شیمیایی محلول آلاینده و شرایط pH محیط. به‌عنوان نمونه، گونه‌ای از باکتری‌های جنس *Sporomusa* توانایی بالایی در جذب سطحی پلوتونیوم نشان داده است. علاوه بر این، باکتری‌های گرم‌مثبت، به‌دلیل برخورداری از گروه‌های فسفات آلی در ساختار اسید تیکوئیک دیواره سلولی، معمولاً ظرفیت بالاتری در جذب یون‌های U (VI) نسبت به باکتری‌های گرم‌منفی دارند. [۱۳، ۱۴]

زیست‌دگرگونی یا زیست‌احیا (Biotransformation/Bioreduction) از جمله مکانیسم‌های اساسی در زیست‌پالایی رادیونوکلیئیدها به‌شمار می‌رود که طی آن میکروارگانیسم‌ها با تغییر در وضعیت اکسیداسیون این عناصر، موجب کاهش حالیت، تحرک‌پذیری و سمیت آنها می‌شوند. این فرآیند می‌تواند به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم و عمدتاً از طریق واکنش‌های آنزیمی همراه با مشارکت دهنده‌ها و پذیرنده‌های الکترون صورت گیرد. نمونه‌ای بارز از این سازوکار، احیای اورانیل [U(VI)] به فرم U(IV) است که مرحله‌ای کلیدی در تثبیت زیستی اورانیوم و کاهش تحرک آن در محیط‌های آلوده محسوب می‌شود. [۱۵، ۱۶]

زیست‌کانی‌سازی (Biomineralization) یکی از راهکارهای کلیدی در تثبیت پایدار رادیونوکلیئیدهاست که طی آن میکروارگانیسم‌ها یون‌های محلول را به ترکیبات معدنی جامد و نامتحرک تبدیل می‌کنند. این فرایند می‌تواند به‌صورت القایی،



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

تحت تأثیر نوسانات pH یا شرایط اکسایش-کاهش، یا به واسطه برهم‌کنش‌های غیرفعال در سطح سلول انجام شود. شواهد نشان می‌دهد که برخی باکتری‌ها با القای رسوب فسفات‌های معدنی، یون‌هایی مانند $U(VI)$ و Pb^{2+} را به فازهای کم‌محلول تبدیل کرده و از تحرک پذیری و سمیت آن‌ها می‌کاهند. [۱۷-۱۹]

تجمع درون‌سلولی (Intracellular Accumulation/Bioaccumulation) یک فرآیند فعال و وابسته به مصرف انرژی است که طی آن رادیونوکلیدها از طریق سازوکارهای انتقالی خاص وارد سلول شده و در ادامه از طریق کمپلکس‌سازی با مولکول‌های درون‌سلولی یا تشکیل گرانول‌های معدنی، در ساختارهای سلولی ذخیره و ایزوله می‌شوند. این مکانیسم، نقش مهمی در کاهش سمیت درون‌سلولی و تنظیم پاسخ سلول به استرس پرتوی ایفا می‌کند. [۲۰]

تشکیل بیوفیلم (Biofilm Formation) به میکروارگانیسم‌ها امکان می‌دهد در قالب ساختاری مجتمع، منسجم و مقاوم، در برابر شرایط محیطی نامطلوب، از جمله وجود رادیونوکلیدها و تنش‌های ناشی از تشعشعات یونیزه‌کننده، بقای خود را حفظ کنند. بیوفیلم‌ها با فراهم آوردن بستری فیزیکی برای جذب، رسوب و تثبیت یون‌های فلزی، نقش مؤثری در ارتقا کارایی فرایندهای زیست‌پالایی ایفا می‌کنند. [۲۱]

در این زمینه، لایه S (S-layer)، که نوعی لایه بلوری پروتئینی سطحی در برخی باکتری‌ها و آرکئا است، نقش مهمی در برهم‌کنش با رادیونوکلیدها دارد. به عنوان مثال، در باکتری‌های گرم‌مثبت، اگرچه حضور گروه‌های فسفات آلی در دیواره سلولی معمولاً جذب یون‌های $U(VI)$ را تسهیل می‌کند، اما لایه S ممکن است با ایجاد ممانعت ساختاری، از میزان جذب سطحی این یون‌ها بکاهد. [۲۲]

حذف گونه‌های فعال اکسیژن (ROS Removal) نیز یکی از سازوکارهای حیاتی در میکروارگانیسم‌های مقاوم به تشعشع است. تولید ROS تحت تأثیر تابش یونیزان می‌تواند منجر به آسیب‌های شدید در ساختار DNA و سایر مولکول‌های زیستی شود. این دسته از میکروارگانیسم‌ها به سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی پیچیده‌ای مجهزند که شامل آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز، و مولکول‌های غیر آنزیمی مانند گلووتاتیون است؛ عناصری که در مهار رادیکال‌های آزاد نقش کلیدی دارند و بقاء سلول را در شرایط پرتوزا ممکن می‌سازند. [۲۳، ۲۴]

در این میان، درک دقیق از شیمی گونه‌های رادیونوکلید برای طراحی راهبردهای مؤثر زیست‌پالایی ضروری است، چراکه سمیت این عناصر تا حد زیادی به حالت اکسیداسیون و گونه شیمیایی آن‌ها وابسته است. از این رو، موفقیت در پالایش زیستی تنها به حذف فیزیکی آلاینده محدود نمی‌شود، بلکه نیازمند تبدیل آن‌ها به اشکال پایدار، کم‌تحرک و با سمیت کمتر است. این هدف، مستلزم انتخاب هدفمند سویه‌های میکروبی طبیعی یا مهندسی‌شده‌ای است که توانایی القای تغییرات شیمیایی مطلوب—نظیر احیای $U(VI)$ محلول به فرم نامحلول $U(IV)$ یا تثبیت دیگر یون‌های متحرک—را داشته باشند. [۲۵]

در نهایت، به دلیل تنوع بالا و پیچیدگی‌های ذاتی شرایط محیطی در سایت‌های آلوده، طراحی مؤثر سامانه‌های زیست‌پالایی مستلزم شناخت دقیق ویژگی‌های هر محل و توسعه راهبردهای میکروبی متناسب با آن است، تا از بیشینه‌سازی اثربخشی و پایداری عملکرد زیستی در محیط‌های واقعی اطمینان حاصل شود.

۲.۲. تحمل تشعشع به عنوان یک عامل تعیین‌کننده کلیدی برای بقا و عملکرد میکروبی

توانایی تحمل سطوح بالای تشعشعات یونیزان یکی از عوامل کلیدی در تضمین بقا و عملکرد میکروارگانیسم‌ها در محیط‌های آلوده به رادیونوکلیدها است. پرتوهای یونیزه‌کننده می‌توانند ساختار DNA، پروتئین‌ها و غشاهای سلولی را تخریب کرده و چرخه سلولی را مختل نمایند. بنابراین، تنها میکروارگانیسم‌هایی با سامانه‌های دفاعی قوی قادر به حفظ فعالیت زیستی و ایفای نقش در زیست‌پالایی مؤثر خواهند بود. [۲۳، ۲۶]



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

Deinococcus radiodurans به عنوان یکی از مقاوم‌ترین باکتری‌های شناخته شده، نه تنها توانایی ترمیم کارآمد DNA دو رشته‌ای شکسته شده را داراست، بلکه از سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی قوی شامل آنزیم‌هایی نظیر کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز و کمپلکس‌های منگنز دو ظرفیتی برای خنثی‌سازی ROS نیز برخوردار است. این ویژگی‌ها به همراه توانایی تشکیل بیوفیلم، D. radiodurans را به گزینه‌ای بالقوه در زیست‌پالایی پرتوزا تبدیل کرده است. گونه‌های مهندسی شده این باکتری در حذف اورانیوم، جیوه و سایر فلزات پرتوزا از طریق رسوب، احیا و کمپلکس‌سازی موفق عمل کرده‌اند. [۲۷، ۲۹-۲۹]

گونه‌هایی مانند Microbacterium flavescens نیز در محیط‌های آلوده به رادیونوکلئیدها، از جمله پلوتونیوم، توریم و امریکیم، توانایی رشد داشته و از طریق ترشح سیدروفورها و اسیدهای آلی، در افزایش فراهمی زیستی و تحرک رادیونوکلئیدها نقش دارند. توانایی این باکتری در جذب کمپلکس‌های فلزی مانند DFOB - Pu (IV) و Fe (III) - DFOB، آن را به یک عامل مؤثر در دینامیک زیستی رادیونوکلئیدها بدل می‌کند. [۳۰]

علاوه بر این، برخی سویه‌های Bacillus با مقاومت نسبی در برابر تشعشع و توانایی تقویت رشد گیاه (PGPR) شناخته می‌شوند و می‌توانند در شرایط پرتوزا نقش دوگانه ایفا کنند. با این حال، اکثر PGPR های رایج از چنین ویژگی‌ای برخوردار نیستند و نیازمند اصلاح ژنتیکی هدفمند برای افزایش مقاومت پرتویی هستند. [۲۹، ۳۱]

این واقعیت که "میکروارگانیسم‌های حساس به تشعشع در محیط‌های آلوده غیرقابل استفاده‌اند"، محدودیت مهمی در توسعه استراتژی‌های زیست‌پالایی ایجاد می‌کند. بقاء در چنین شرایطی یک پیش‌نیاز غیرقابل اجتناب است؛ زیرا در صورت آسیب به ساختارهای حیاتی سلولی، عملکرد زیستی به‌ویژه در زمینه پالایش آلاینده‌ها از بین می‌رود. [۲۹، ۳۱]

در این میان، توانایی تشکیل بیوفیلم به عنوان یک ویژگی سازشی حیاتی ظاهر می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که D. radiodurans در حالت بیوفیلم توانایی حذف اورانیل را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. ماتریس پلی‌ساکارید خارج سلولی (EPS) در این ساختار، محافظت فیزیکی در برابر تشعشع و سمیت شیمیایی فراهم کرده و تراکم سلولی و کارایی آنزیمی را افزایش می‌دهد. این سازوکار باعث می‌شود میکروارگانیسم‌ها بر بسیاری از محدودیت‌های ناشی از پراکندگی پلانکتونیک غلبه کنند. [۳۲]

در نتیجه، مهندسی PGPR هایی با ظرفیت تشکیل بیوفیلم قوی، می‌تواند مسیر مناسبی برای غلبه بر چالش تحمل پرتوزا و حفظ عملکرد تقویت رشد گیاه در شرایط سخت زیست‌محیطی باشد. این رویکرد نیازمند تمرکز آینده پژوهانه بر فاکتورهای ژنتیکی و زیست‌بوم‌شناختی مؤثر در تشکیل بیوفیلم است، که می‌تواند شکاف بین بقاء و کارایی را در شرایط پرتوزا پر کند. [۳۲، ۳۳]

۳. ویژگی‌های تقویت‌کننده رشد گیاه در PGPR

این بخش به بررسی جامع سازوکارهایی می‌پردازد که باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) از طریق آن‌ها رشد، زیست‌توده و تحمل تنش گیاه را افزایش می‌دهند. این سازوکارها به‌طور کلی به مکانیسم‌های مستقیم (مانند تولید فیتوهورمون‌ها و تسهیل جذب عناصر غذایی) و غیرمستقیم (نظیر القای مقاومت سیستمیک و کاهش تنش اکسیداتیو) تقسیم می‌شوند و تأثیرات آن‌ها بر پارامترهای فیزیولوژیکی و عملکرد کلی گیاه در محیط‌های چالش‌برانگیز، به‌ویژه در خاک‌های آلوده به رادیونوکلئیدها، مورد بحث قرار خواهد گرفت. [۳۴-۳۶]

۳.۱. مکانیسم‌های مستقیم تقویت رشد گیاه



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) با استفاده از مجموعه‌ای از مکانیسم‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی، مستقیماً فرآیند رشد گیاهان را در شرایط نرمال و استرس‌زا بهبود می‌بخشند. این مکانیسم‌ها نه تنها در افزایش زیست‌توده و بهره‌وری گیاه مؤثرند، بلکه در محیط‌های آلوده به فلزات سنگین و رادیونوکلئیدها نیز نقش حیاتی ایفا می‌کنند. [۳۷، ۷، ۳]

یکی از اصلی‌ترین سازوکارها، سنتز و ترشح فیتوهورمون‌هایی مانند این دول-۳-استیک اسید (IAA)، جبرلین‌ها و سیتوکینین‌ها است. IAA به‌طور خاص با تحریک تقسیم سلولی، توسعه ریشه و جذب مؤثرتر مواد مغذی، در ارتقا رشد گیاه و افزایش تاب‌آوری آن در برابر تنش‌های محیطی نقش کلیدی دارد. [۳۷، ۷، ۳]

مکانیسم مهم دیگر، فعالیت آنزیم ACC دآمیناز است که با تجزیه پیش‌ساز اتیلن (هورمون مرتبط با تنش)، غلظت آن را در ناحیه ریشه کاهش می‌دهد. این کاهش موجب مهار اثرات منفی اتیلن بر رشد شده و به افزایش طول ریشه، توسعه ساقه و بهبود جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم منجر می‌شود؛ به‌ویژه در مواجهه با تنش‌هایی نظیر شوری، خشکی یا فلزات سنگین. [۳۴، ۳]

سیدروفورها، ترکیبات کم‌مولکول کلات‌کننده آهن که توسط بسیاری از PGPR ها تولید می‌شوند، نقش دوگانه دارند: آن‌ها با افزایش فراهمی زیستی آهن برای گیاه، عملکرد فتوسنتزی و رشد را ارتقا می‌دهند و هم‌زمان با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با فلزات سنگین و رادیونوکلئیدهایی نظیر آلومینیوم، کادمیوم، سرب و اورانیوم، اثرات سمی این عناصر را کاهش می‌دهند. این ویژگی، سیدروفورها را به عناصر کلیدی در زیست‌پالایی در محیط‌های آلوده تبدیل می‌کند. [۷، ۳]

از دیگر مسیرهای مؤثر، تثبیت بیولوژیکی نیتروژن توسط دیازوتروفها است که منبعی پایدار از آمونیاک قابل استفاده برای گیاه فراهم می‌سازد. همچنین، توانایی PGPR ها در حل ترکیبات نامحلول فسفات و پتاسیم از طریق ترشح اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین، قابلیت جذب این عناصر کلیدی را به‌طور مؤثری افزایش می‌دهد. [۷، ۳]

در نهایت، تولید ترکیبات آلی فرار (VOCs) نظیر استات، بوتانول و آلدئیدها توسط برخی PGPR ها، مسیرهای سیگنالینگ گیاهی را تحت تأثیر قرار داده و موجب بهبود رشد و تحمل تنش‌های غیرزیستی می‌شود. این ترکیبات همچنین می‌توانند با میکروارگانیسم‌های ریزوسفری تعامل برقرار کرده و یک اکوسیستم ریشه‌ای پایدارتر ایجاد کنند.

مجموعه این مکانیسم‌ها، به‌ویژه در خاک‌های آلوده به رادیونوکلئیدها، نه تنها به گیاهان کمک می‌کنند تا بر تنش‌های ناشی از تشعشع و فلزات سنگین غلبه کنند، بلکه شرایط بهینه‌ای برای بقا و عملکرد باکتری‌های همزیست فراهم می‌سازند، که این خود پیش‌نیازی حیاتی برای تحقق عملکرد دوگانه در زیست‌پالایی پایدار است.

۳.۲. مکانیسم‌های غیرمستقیم برای تحمل استرس و پاسخ‌های دفاعی

علاوه بر نقش‌های مستقیم، PGPR ها از طریق مسیرهای غیرمستقیم نیز در ارتقا رشد گیاه و افزایش مقاومت در برابر تنش‌های محیطی نقش کلیدی دارند. این مکانیسم‌ها، که اغلب در پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی فعال می‌شوند، زمینه‌ساز ایجاد یک محیط ریزوسفری پایدارتر و گیاه‌پسندتر هستند. [۳۸]

یکی از مهم‌ترین سازوکارها، کنترل زیستی پاتوژن‌ها است PGPR ها با رقابت برای منابع و جایگاه‌های اتصال در ریزوسفر، ترشح متابولیت‌های ضدقارچی مانند سیانید هیدروژن (HCN)، فنیاژین‌ها و پیرول‌نیتین، و تحریک پاسخ‌های دفاعی گیاه از طریق القای مقاومت سیستمیک (ISR)، به‌طور مؤثری از بروز بیماری‌های گیاهی جلوگیری می‌کنند. این فرآیند نه تنها باعث کاهش فشار زیستی می‌شود، بلکه انرژی بیشتری را برای رشد گیاه فراهم می‌سازد. [۳۹]

در مواجهه با تنش‌های غیرزیستی نظیر خشکی، شوری و دماهای شدید، PGPR ها با تعدیل تنش اکسیداتیو و اسمزی، اثرات منفی محیط را کاهش می‌دهند. [۴۰] آن‌ها از طریق سنتز اسمولیت‌ها و ترکیبات سازگار (مانند پرولین، گلاسیسین بتائین و ترهالوز)، حفظ پتانسیل اسمزی سلول‌های گیاهی را تسهیل کرده، فراهمی عناصر غذایی را در شرایط تنش افزایش



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

می‌دهند و با تغییر pH ریزوسفر، دسترسی به منابع را بهبود می‌بخشند. این توانایی به‌ویژه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و رادیونوکلئیدها اهمیت می‌یابد.

از منظر مولکولی، برخی PGPR ها به‌عنوان زیست‌محرك‌های ژنتیکی عمل می‌کنند و بیان ژن‌هایی را که در رشد سلولی، تنظیم مسیرهای دفاعی و سنتز اجزای دیواره سلولی (نظیر سلولز) نقش دارند، تحریک می‌نمایند. این تحریکات ژنتیکی می‌توانند سبب افزایش تحمل گیاه به استرس و بهبود ساختار و کارکرد ریشه شوند. [۳۸]

ترکیب این مسیرهای غیرمستقیم با توانایی زیست‌پالایی، بستر مناسبی برای عملکرد دوگانه فراهم می‌کند، که در آن PGPR ها هم به تقویت سیستم دفاعی گیاه و هم به پالایش مؤثر آلاینده‌های پرتوزا کمک می‌نمایند.

۳.۳. تأثیر بر پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه

تلقیح با باکتری‌های همیار رشد گیاه (PGPR) موجب بهبود طیف گسترده‌ای از شاخص‌های فیزیولوژیکی در گیاهان می‌شود؛ شاخص‌هایی که نقشی کلیدی در ارتقای سلامت عمومی، کارایی متابولیکی و تاب‌آوری گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی ایفا می‌کنند [۴۱، ۴۲].

PGPR ها با افزایش قابل‌توجه در طول ساقه و ریشه، وزن خشک و زیست‌توده کلی، ظرفیت رشد و بهره‌وری گیاه را ارتقا می‌دهند. همچنین، سطح بالاتر رنگدانه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل و کاروتنوئیدها در گیاهان تلقیح‌شده، بیانگر افزایش ظرفیت فتوسنتزی، نرخ جذب کربن و کارایی نوری است. مطالعات نشان داده‌اند که چنین گیاهانی حتی در شرایط تنش نیز نرخ خالص فتوسنتز بالاتری را حفظ می‌کنند، که این امر بر نقش حفاظتی PGPR ها در حفظ عملکردهای اصلی فیزیولوژیکی تأکید دارد. [۴۱، ۴۳، ۴۴]

افزایش جذب درشت‌مغذی‌ها (نیتروژن، فسفر، پتاسیم) و ریزمغذی‌های ضروری (نظیر آهن، منیزیم و کلسیم) یکی از ویژگی‌های بارز فعالیت PGPR هاست. این امر از طریق افزایش انشعابات ریشه‌ای، بهبود فراهمی زیستی مواد مغذی، اسیدی‌سازی ریزوسفر و افزایش بیان ناقل‌های یونی در سطح سلول‌های ریشه‌ای صورت می‌گیرد. [۴۲]

از نظر دفاع فیزیولوژیکی، PGPR ها موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و پراکسیداز (POD) می‌شوند که نقش حیاتی در مهار گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و حفاظت ساختارهای کلروپلاستی در برابر استرس اکسیداتیو دارند. علاوه بر این، افزایش سطح متابولیت‌های دفاعی نظیر پرولین، فنول‌ها و فلاونوئیدها، سازوکارهای سازگاری گیاه را در برابر تنش‌های غیرزیستی تقویت می‌کند [۴۲، ۴۴].

گرچه اصطلاح «باکتری‌های تقویت‌کننده رشد» بر ارتقای رشد در شرایط ایده‌آل تمرکز دارد، بررسی مکانیسم‌های عملکرد PGPR ها نشان می‌دهد که بسیاری از این سازوکارها در واقع در خدمت کاهش تنش‌های زیستی و غیرزیستی هستند. فعالیت آنزیم ACC دآمیناز (در کاهش اتیلن ناشی از تنش)، تولید سیدروفور (در مهار سمیت فلزات سنگین و رادیونوکلئیدها) و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، همگی نشان‌دهنده نقش حیاتی این باکتری‌ها در بقای گیاهان در محیط‌های نامساعد است. بنابراین، نقش آن‌ها تنها به ارتقای رشد محدود نمی‌شود، بلکه پیش‌نیاز زنده‌مانی و بروز عملکرد مؤثر گیاه در شرایط پرتوزا تلقی می‌شود. [۳۰، ۴۲، ۴۴]

سیدروفورها به‌عنوان نمونه‌ای شاخص از این عملکرد دوگانه، علاوه بر تأمین آهن، با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با فلزات سنگین (مانند Zn, Pb, Cd, Al) و رادیونوکلئیدهایی مانند اورانیوم، پلوتونیوم و توریم، در پاکسازی محیط نیز مؤثر واقع می‌شوند. این عملکرد دوگانه، همان‌گونه که در *Microbacterium flavescens* نیز گزارش شده، یک هم‌پوشانی عملکردی ذاتی ایجاد می‌کند که PGPR های تولیدکننده سیدروفور را به کاندیداهای برتر برای کاربردهای دوگانه تبدیل



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

می‌کند. با این حال، به دلیل افزایش احتمالی تحرک رادیونوکلئیدها، کاربرد این سویه‌ها باید به دقت متناسب با هدف نهایی زیست‌پالایی (تثبیت در مقابل استخراج) طراحی شود. [۳۰]

در نهایت، آنچه تحت عنوان «فرضیه افزایشی» مطرح می‌شود، تأکید دارد که PGPRها معمولاً از ترکیب چند مکانیسم مکمل به طور هم‌افزا بهره می‌برند. سویه‌های مؤثر در محیط‌های پرتوزا نه تنها باید رشد گیاه را تقویت کنند، بلکه باید با مکانیسم‌های متعدد و هم‌زمان، استرس‌های شدید را نیز کاهش دهند. این مسئله نیازمند غربالگری دقیق یا مهندسی سویه‌های چند مکانیسمی است که بتوانند به صورت هم‌زمان بهبود رشد، تنظیم هورمونی، افزایش جذب مواد مغذی، و کاهش سمیت رادیونوکلئیدها را محقق سازند و در نهایت، بستر زیست‌پالایی پایدار را برای گیاهان فراهم آورد. [۴۵]

۴. جدول تحلیلی همپوشانی عملکردی PGPR و زیست‌پالایی پرتوزا

۴.۱. مکانیسم‌های همپوشان: ارائه جدول

این بخش یک جدول تحلیلی ساخت‌یافته ارائه می‌دهد که به صورت نظام‌مند، نواحی عملکردی همپوشان میان مکانیسم‌های اثبات‌شده PGPR و فرآیندهای کلیدی زیست‌پالایی رادیونوکلئیدها را شناسایی و طبقه‌بندی می‌کند. این همپوشانی نه تنها نشان‌دهنده قابلیت‌های بالقوه برای استفاده دوگانه از PGPRها است، بلکه شواهد تجربی و مفهومی لازم برای اعتباربخشی به «فرضیه عملکرد دوگانه» را فراهم می‌سازد. جدول پیش‌رو به عنوان یک ابزار تحلیلی یکپارچه، امکان تجسم روشن روابط عملکردی، هم‌افزایی زیستی، و اولویت‌بندی سویه‌های چندکاره برای کاربردهای زیست‌فناورانه در محیط‌های پرتوزا را فراهم می‌کند. چنین تجزیه و تحلیل برای طراحی استراتژی‌های دقیق و مهندسی‌شده در حوزه فیتوبایورمیدیاسیون و انتخاب PGPRهای هدفمند، حیاتی است.

جدول ۱- همپوشانی مکانیسم‌های PGPR با فرآیندهای زیست‌پالایی رادیونوکلئیدها و سویه‌های مستند

شده مرتبط (گردآوری شده از منابع [۱، ۷، ۳۲، ۴۰، ۴۶])

مکانیسم / PGPR ویژگی	منفعت برای گیاه	منفعت برای زیست‌پالایی	نوع همپوشانی	سویه‌های نمونه
تولید سیدروفور	افزایش جذب آهن؛ کاهش سمیت فلزات سنگین	تسهیل تحرک و انحلال رادیونوکلئیدها	کمپلکس‌سازی مستقیم با عناصر؛ مؤثر در فیتواستخراج یا فیتوتثبیت	<i>M. flavescens</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>Azotobacter</i>
دآمیناز ACC	کاهش اتیلن؛ رشد ریشه / ساقه؛ N, P, K جذب بهتر	کاهش استرس غیرزیستی؛ پایداری گیاه در آلوده‌خاک	پشتیبانی غیرمستقیم از زیست‌پالایی از طریق افزایش زیست‌توده	<i>P. fluorescens</i> <i>YsS6</i> , <i>P. migulae</i> <i>8R6</i>
تولید اسیدهای آلی	انحلال فسفات و عناصر ریزمغذی	تغییر تحرک و گونه‌بندی رادیونوکلئیدها	افزایش فراهمی زیستی برای گیاه و آلاینده‌ها	<i>M. flavescens</i>



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

<i>D. radiodurans</i> (DRI-bf+)	ایجاد ریزمحیط حفاظتی مؤثر برای باکتری و پاکسازی	کاهش سمیت، تثبیت رادیونوکلئیدها، بهبود تحمل به تشعشع	افزایش سازگاری و پایداری ریشه‌زایی	تشکیل بیوفیلم
<i>Pseudomonas</i> , <i>Enterobacter</i>	پیش‌نیاز بنیادی برای عملکرد زیست‌پالایی	افزایش بقای سیستم گیاه- میکروب در سایت پرتوزا	مقابله با شوری، خشکی، فلزات سنگین	تحمل استرس محیطی
<i>D. radiodurans</i> , باکتری‌های مقاوم به رادیکال	محافظت دوگانه از گیاه و میکروب در برابر اکسیداتیو	کاهش آسیب پرتوهای یونیزه؛ ادامه فعالیت متابولیک	حفاظت فتوسنتز؛ ROS کاهش	آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی
<i>P. fluorescens</i> , <i>Kocuria sp.</i> <i>CRB15</i>	پشتیبانی غیرمستقیم از پاکسازی با افزایش سطح جذب گیاه	افزایش ظرفیت جذب گیاه برای فیتوپالایی	رشد ریشه، تجمع زیست‌توده، جذب مؤثر مواد	فیتوهورمون‌ها (IAA و...)
<i>Azospirillum</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i>	حمایت غیرمستقیم از فیتوپالایی از طریق تغذیه کافی	افزایش زیست‌توده، کارایی جذب پایدار آلاینده‌ها	تغذیه مؤثر، رشد بہتر	حل عناصر (N/P)

۴.۲. تحلیل مفهومی: از جذب تا دگرگونی شیمیایی

جدول ۱ به وضوح نشان می‌دهد که برخی از مکانیسم‌های مشخص PGPR، نظیر تولید سیدروفور و ترشح اسید آلی، قادرند تحرک رادیونوکلئیدها را تسهیل کنند. این فرایندهای شیمیایی به‌ویژه در مواردی مانند فیتواستخراج (که در آن گیاهان به‌طور فعال آلاینده‌ها را جذب می‌کنند) مزایای قابل‌توجهی را ارائه می‌دهند. با این حال، این افزایش حلالیت و تحرک نه تنها می‌تواند مفید باشد بلکه پتانسیل خطرناک انتشار گسترده‌تر رادیونوکلئیدها را به محیط‌های آبی و سایر اجزای اکوسیستم در صورتی که آلاینده‌ها به‌طور مؤثر جذب نشوند یا در محدوده پاکسازی مهار نگردند، به‌همراه دارد. [۴۸، ۴۷، ۴۱]

این تضاد ذاتی در عملکردهای دوگانه میکروب‌ها به‌ویژه هنگام استفاده از PGPR ها در پروژه‌های زیست‌پالایی مطرح می‌شود. از این‌رو، استراتژی‌های پاکسازی باید به‌طور دقیق طراحی شوند و نظارت مستمر بر حرکت رادیونوکلئیدها به‌وسیله فناوری‌های حسگر پیشرفته ضروری است تا از وقوع انتشار غیر مؤثر و آسیب‌زننده جلوگیری شود. این نیاز به نظارت دقیق در عملیات میدانی برای اطمینان از دستیابی به نتایج مطلوب در حذف یا جذب آلاینده‌ها، بدون تشدید ناخواسته مشکلات ناشی از افزایش تحرک، یک موضوع بسیار حائز اهمیت است. [۱]

علاوه بر این، در حالی که جدول بر روی مکانیسم‌هایی که منجر به جذب و تجمع رادیونوکلئیدها توسط گیاهان می‌شود، تأکید دارد، باید به قابلیت‌های میکروبی نیز توجه شود. این قابلیت‌ها شامل زیست‌دگرگونی یا کاهش سمیت رادیونوکلئیدها



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

(برای مثال کاهش U (VI) به U (IV) توسط باکتری‌ها (و تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی است که به‌طور مستقیم از آسیب‌های ناشی از تشعشع جلوگیری می‌کنند. [۴۹]

به‌عنوان مثال، *Deinococcus radiodurans* به‌دلیل توانایی‌اش در تبدیل اشکال سمی فلزات سنگین) مانند Cr^{6+} به Cr^{3+} و Hg^{2+} به Hg^0 شناخته‌شده است. این نشان می‌دهد که هدف نهایی زیست‌پالایی صرفاً جابه‌جایی و متمرکز کردن رادیونوکلئیدها نیست، بلکه باید به کاهش سمیت این آلاینده‌ها و تثبیت آن‌ها در اشکال کمتر متحرک و کمتر مضر نیز توجه شود. [۴۹، ۲۸]

بنابراین، استراتژی‌های موفق و مؤثر در زیست‌پالایی باید نه تنها بر حذف فیزیکی و جداسازی آلاینده‌ها متمرکز کنند، بلکه باید تبدیل کیفی آن‌ها به گونه‌های شیمیایی با سمیت کمتر یا پایدارتر را نیز در اولویت قرار دهند. این رویکرد به‌طور طبیعی تعریف موفقیت پاکسازی را از یک فرآیند کمی (کاهش غلظت) به یک فرآیند کیفی (کاهش آسیب زیست‌محیطی و بهداشتی) تغییر می‌دهد.

در نهایت، این تحلیل نشان می‌دهد که پاکسازی مؤثر از رادیونوکلئیدها به‌ویژه در محیط‌های آلوده پیچیده، نیازمند ارزیابی دقیق گونه‌بندی شیمیایی آلاینده‌ها است و نمی‌توان تنها به اندازه‌گیری کل غلظت آن‌ها اکتفا کرد. برای رسیدن به اهداف بلندمدت در زیست‌پالایی، شایسته است که به‌دقت فرآیندهای شیمیایی و زیستی که میکروب‌ها در آن دخیل هستند، مورد بررسی و نظارت قرار گیرند. [۵۰]

۵. امکان‌سنجی عملکرد دوگانه: تحلیل شواهد و شناسایی خلأهای پژوهشی

در این بخش، شواهد تجربی موجود پیرامون فرضیه «عملکرد دوگانه» مورد ارزیابی انتقادی قرار می‌گیرد؛ مفهومی که به کاربرد هم‌زمان باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) برای تقویت زیست‌توده گیاه و پاکسازی مؤثر رادیونوکلئیدها در محیط‌های آلوده اشاره دارد. این ارزیابی با تمایز بین داده‌های مستند در حوزه فیتوپالایی فلزات سنگین، شواهد پراکنده پیرامون رادیونوکلئیدها، و فقدان مطالعات تلفیقی در شرایط پرتوزا، چارچوبی نظام‌مند برای سنجش قابلیت‌های کاربردی PGPR در سناریوهای پیچیده محیطی ارائه می‌دهد. [۵۳-۵۱]

رادیونوکلئیدها، برخلاف فلزات سنگین، با ویژگی‌هایی مانند پرتوزایی یونیزان، ناپایداری ایزوتوپی، و تولید گونه‌های اکسیژن فعال همراه‌اند که پیامدهای فیزیولوژیکی و اکولوژیکی منحصر به فردی را برای گیاه و میکروب ایجاد می‌کنند. از این رو، ارزیابی عملکرد PGPR در چنین بسترهایی نیازمند نگاهی فراتر از داده‌های قابل تعمیم از مطالعات فلزات سنگین است. سه بخش پیش‌رو به‌ترتیب به: (۱) شواهد معتبر در مورد فیتوپالایی فلزات سنگین، (۲) داده‌های پراکنده پیرامون رادیونوکلئیدها، و (۳) فقدان مطالعات ترکیبی عملکرد دوگانه در شرایط پرتوزا خواهند پرداخت و خلأهای پژوهشی کلیدی را شناسایی می‌کنند که برای طراحی راهبردهای زیست‌پالایی پایدار و واقع‌بینانه ضروری‌اند. [۱۲، ۵۱، ۵۴]

۵.۱. شواهد از فیتوپالایی فلزات سنگین

طیف وسیعی از مطالعات تجربی، کارایی میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه (PGPR) را در بهبود فیتوپالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین تأیید کرده‌اند. این باکتری‌ها به‌طور مؤثر موجب افزایش رشد گیاه، تجمع زیست‌توده، و ارتقا جذب، انتقال و تجمع فلزات سنگین مختلف از جمله Ni ، Pb ، Cu ، Zn ، Cd ، Cr ، As و Hg می‌شوند. مکانیسم‌های درگیر در این تعاملات شامل تولید سیدروفور، ترشح اسیدهای آلی، فعالیت آنزیم ACC دآمیناز و تحمل تنش‌های غیرزیستی هستند که مستقیماً به فیتوپالایی مؤثر کمک می‌کنند و به‌صورت مفهومی با مکانیسم‌های مرتبط با رادیونوکلئیدها همپوشانی دارند. [۷، ۵۵]



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

سویه‌های متعدد PGPR متعلق به جنس‌هایی نظیر *Pseudomonas*، *Bacillus*، *Azospirillum*، *Rhizobium*، *Klebsiella*، *Stenotrophomonas* شناسایی و به‌عنوان عوامل مؤثر در فیتوپالایی فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این بدنه غنی از شواهد، بنیانی نظری و عملی قوی برای توسعه رویکردهای مبتنی بر PGPR در پاکسازی فلزات سنگین فراهم می‌آورد. [۵۶، ۷]

با این حال، تحلیل‌های نقادانه نیز نشان می‌دهند که این شواهد به‌تنهایی برای تعمیم مستقیم به سیستم‌های آلوده به رادیونوکلئیدها کافی نیستند. به‌طور خاص، یک مرور سیستماتیک اخیر تصریح می‌کند که: «مطالعه ارائه‌شده حاوی هیچ شواهد مستقیمی برای فیتوپالایی رادیونوکلئیدها نیست؛ تمرکز آن منحصرأ بر فلزات سنگین است.» [۵۴]

این موضوع بر شکاف روش‌شناختی قابل توجهی دلالت دارد. اگرچه همپوشانی در برخی سازوکارها میان فلزات سنگین و رادیونوکلئیدها وجود دارد، اما پرتوایی به‌عنوان یک عامل استرس‌زای مستقل، لایه‌ای از پیچیدگی بیولوژیکی و اکولوژیکی را وارد می‌کند که نمی‌توان آن را از طریق قیاس‌های ساده با سمیت شیمیایی فلزات ارزیابی کرد. ویژگی‌هایی نظیر آسیب مستقیم به DNA، تولید شدید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، و رفتار شیمیایی منحصره‌فرد از جمله گونه‌بندی و محصولات واپاشی، رادیونوکلئیدها را به چالش‌هایی متمایز تبدیل می‌کنند. [۵۷]

در نتیجه، طراحی و اعتبارسنجی تجربی برای فیتوپالایی رادیونوکلئیدها باید مبتنی بر آزمایش‌های اختصاصی باشد که تأثیر پرتوایی و ویژگی‌های خاص این آلاینده‌ها را به‌طور صریح در نظر می‌گیرد. اتکالی صرف به نتایج حاصل از فلزات سنگین، بدون درک عمیق از تفاوت‌های بنیادی، می‌تواند منجر به ارزیابی‌های نادرست و عدم موفقیت در مقیاس‌های میدانی شود.

۵.۲. شواهد پراکنده در مورد فیتوپالایی رادیونوکلئیدها

شواهد تجربی مستقیم برای سویه‌های PGPR که به‌طور همزمان باعث پاکسازی مؤثر رادیونوکلئیدها و بهبود رشد گیاه در شرایط واقعی استرس پرتوزا شوند، هنوز محدود و پراکنده‌اند. یکی از معدود نمونه‌های برجسته، *Microbacterium flavescens* است که در حضور ایزوتوپ‌های پرتوزا نظیر Pu، Th، U و Am قادر به رشد بوده و با تولید اسیدهای آلی و سیدروفورها، موجب حل‌سازی و افزایش تحرک این عناصر می‌شود. این سویه همچنین قادر به جذب کمپلکس‌های Pu-DFOB (IV)- از طریق سیستم‌های جذب آهن وابسته به سیدروفور است. با این حال، مطالعات موجود نشانگر عملکرد همزمان این سویه در تقویت رشد گیاه تحت تنش پرتوزا نیستند [۵۸، ۵۹، ۳۰].

اگرچه برخی منابع به‌طور کلی به اهمیت PGPR در فیتوپالایی رادیونوکلئیدها اشاره دارند، اما شواهد تجربی جزئی و قابل استناد درباره‌ی سویه‌هایی که همزمان هر دو عملکرد—پاکسازی و ارتقا رشد گیاه—را تحت پرتوایی نشان دهند، ارائه نشده است. توصیف موجود از داده‌ها، نشان‌دهنده‌ی وضعیت «پراکنده»ی شواهد است که با اتکالی صرف بر نمونه‌ی محدود *M. flavescens* نمی‌تواند پشتیبانی تجربی کافی برای «فرضیه عملکرد دوگانه» فراهم آورد [۳۰، ۶۰].

این شکاف دانش نشان می‌دهد که اگرچه فعالیت‌های میکروبی مرتبط با رادیونوکلئیدها در سطح مولکولی یا شیمیایی مستند شده‌اند، اما شواهدی مبنی بر عملکرد هم‌افزای گیاه و میکروب در یک سیستم زنده و پرتوزا، با نتایج قابل سنجش در هر دو بعد زیست‌پالایی و فیزیولوژی گیاه، همچنان ناکافی باقی مانده است.



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

بنابراین، ضرورت دارد که طراحی مطالعات آتی فراتر از آزمایش‌های ایزوله حرکت کرده و با استفاده از طرح‌های تجربی یکپارچه، چند متغیره و کنترل‌شده، عملکرد سویه‌های خاص PGPR را در کنار گیاهان تحت پرتوایی آزمایش کنند. این مطالعات باید هم‌زمان به کمی‌سازی اثربخشی پاکسازی رادیونوکلئیدها و ارزیابی پاسخ‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه بپردازند تا شواهد تجربی برای اعتبارسنجی فرضیه عملکرد دوگانه فراهم شود.

۵.۳. ضعف شواهد ترکیبی برای عملکرد دوگانه در شرایط پرتوزا

مهم‌ترین محدودیت موجود در مسیر بهره‌برداری از PGPR ها برای زیست‌پالایی پرتوزا، فقدان شواهد تجربی منسجم و قوی است که عملکرد دوگانه‌ی هم‌زمان آن‌ها را—یعنی پاکسازی مؤثر رادیونوکلئیدها و ارتقا رشد گیاه—در شرایط پرتوایی واقعی تأیید کند. اغلب مطالعات یا بر توانایی PGPR ها در ارتقا رشد گیاه در مواجهه با تنش‌های غیرزیستی عمومی تمرکز دارند، یا تنها مقاومت میکروارگانیسم‌ها به تشعشع و توانایی آن‌ها در حذف رادیونوکلئیدها را بررسی کرده‌اند، اما کمتر پژوهشی این دو عملکرد را در یک سیستم تلفیقی و واقع‌گرایانه ترکیب کرده است. [۶۱]

علاوه بر این، چالش‌های شناخته‌شده‌ی فیتوپالایی—نظیر نرخ کند رشد گیاه، محدودیت عمق نفوذ ریشه برای استخراج آلاینده‌های عمقی، و حساسیت گیاهان به سمیت مستقیم فلزات و ترکیبات پرتوزا—در محیط‌های پرتوزا به‌مراتب شدیدتر می‌شوند. یکی از نگرانی‌های جدی، مدیریت زیست‌توده‌ی گیاهی آلوده پس از انجام فرایند پالایش است. در شرایطی که رادیونوکلئیدها در اندام‌های هوایی یا ریشه گیاه تجمع می‌یابند، دفع ایمن این زیست‌توده پس از پاکسازی الزامی است، زیرا می‌تواند منبعی ثانویه برای آلودگی محیطی محسوب شود. [۶۲، ۶]

تأکید بر این که فیتوپالایی به صرف جذب آلاینده ختم نمی‌شود بلکه نیازمند استراتژی‌های جامع برای مدیریت مرحله پس از پاکسازی است، از منظر زیست‌محیطی بسیار حیاتی است. در عمل، «موفقیت» زیست‌پالایی تنها بر مبنای حذف کمی آلاینده‌ها از خاک یا آب قابل سنجش نیست، بلکه باید شامل بررسی دقیق سرنوشت آلاینده‌ها پس از جذب در زیست‌توده‌ی گیاهی نیز باشد. غفلت از این موضوع می‌تواند منجر به ارزیابی خوش‌بینانه و نادرست از کارایی فناوری‌های زیست‌پالایی شود. [۶۲، ۵۴]

بنابراین، یک چارچوب جامع برای ارزیابی امکان‌سنجی سیستم‌های PGPR با عملکرد دوگانه باید نه تنها بر کارایی در محل (in situ) در کاهش یا تبدیل رادیونوکلئیدها تمرکز کند، بلکه مدیریت پایدار زیست‌توده آلوده را نیز به‌طور یکپارچه در نظر بگیرد. این شامل توسعه فناوری‌های مکمل برای کاهش حجم زیست‌توده، سم‌زدایی شیمیایی یا زیستی، بازیابی انرژی، یا دفن ایمن بلندمدت است. این لایه‌ی اضافی از پیچیدگی و هزینه باید در تحلیل نهایی کارآمدی و پایداری چنین راهکارهایی لحاظ شود. [۶۳]

۶. چالش‌های سیستمی برای تحقق عملکرد دوگانه در محیط‌های پرتوزا

با وجود پیشرفت‌های اخیر در شناسایی ویژگی‌های همپوشان بین PGPR و فرآیندهای زیست‌پالایی، پیاده‌سازی عملی یک سیستم میکروبی-گیاهی با عملکرد دوگانه پایدار در محیط‌های آلوده به رادیونوکلئید همچنان با موانع پیچیده و چندلایه مواجه است. [۶۴، ۶۵] این بخش به‌صورت نظام‌مند به سه مانع کلیدی می‌پردازد که توان بالقوه PGPR را برای ایفای نقش همزمان در ارتقای رشد گیاه و پاکسازی مؤثر پرتوزا محدود می‌کنند:

(۱) ثرات مستقیم پرتوهای یونیزان بر بقاء و عملکرد میکروبی، (۲) فقدان مقاومت رادیویی ذاتی در اکثر PGPR های رایج و چالش‌های زیستی / اخلاقی ناشی از مهندسی ژنتیکی آن‌ها، و (۳) نبود داده‌های تجربی بلندمدت در تعاملات واقعی ریزوسفری در شرایط پرتوزا.



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

در مجموع، این چالش‌ها بر نیاز به طراحی‌های چندرشته‌ای و دیدگاه‌های اکولوژیکی-مولکولی برای توسعه راه‌حل‌های قابل اطمینان و پایدار تأکید دارند. [۶۶]

۶.۱. تشعشع: تهدیدی اساسی برای بقای میکروب و کارایی زیست‌پالایی

محیط‌های آلوده به رادیونوکلئیدها با حضور پرتوهای یونیزان، یک چالش بنیادی برای موجودات زنده ایجاد می‌کنند. این پرتوها از طریق رادیولیز آب و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، آسیب‌های ژنوتوکسیک شدیدی به باکتری‌ها وارد می‌کنند و ساختار DNA، پروتئین‌ها، لیپیدها و سایر اجزای سلولی را به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر قرار می‌دهند. چنین آسیبی اغلب منجر به مهار تقسیم سلولی، اختلال عملکردی، و در نهایت کاهش شدید زیست‌توده می‌شود. شواهد متعددی تأکید دارند که زیست‌بوم‌های رادیواکتیو معمولاً با تراکم پایین میکروبی و فعالیت زیستی محدود همراه هستند. این شرایط نه تنها بقای باکتری‌ها، بلکه زیست‌پالایی مؤثر و بقای گیاهان را نیز تحت تهدید قرار می‌دهد. [۶۷-۶۹]

در چنین محیط‌هایی، بقا خود پیش‌نیاز عملکرد است. همان‌طور که یکی از منابع کلیدی بیان می‌کند: «ارگانیسم‌های حساس به تشعشع نمی‌توانند در محیط‌های آلوده به پسماندهای پرتوزا و ترکیبات آلی دوام بیاورند.» این اصل زیستی نشان می‌دهد که بدون مقاومت در برابر تشعشع، ویژگی‌هایی نظیر تولید سیدروفور، اسید آلی یا ACC دامیناز فاقد کارایی واقعی خواهند بود. بنابراین، طراحی مؤثر سیستم‌های PGPR برای فیتوپالایی پرتوزا، نیازمند انتخاب یا مهندسی سویه‌هایی است که اولویت نخست آنها مقاومت در برابر پرتوزایی شدید باشد. [۶۴]

رویکردهای پیشنهادی در این زمینه شامل بیوپراسپکته‌نگ در محیط‌های شدید (مانند مناطق پرتوزا یا صحرای آتاکاما) برای یافتن سویه‌های مقاوم طبیعی و همچنین انتقال ژن‌های مقاومت از باکتری‌های اکستروموفیل مانند *Deinococcus radiodurans* به PGPRهای رایج‌تر هستند. با چنین رویکردهایی، می‌توان سویه‌هایی را توسعه داد که نه تنها در برابر تشعشع مقاوم باشند، بلکه بتوانند تعاملات زیست‌پالایی و تقویت رشد گیاه را نیز در محیط‌های بسیار نامساعد حفظ کنند. در نهایت، برای اثربخشی در فیتوپالایی رادیونوکلئیدها، تمرکز پژوهش نباید صرفاً بر ویژگی‌های عملکردی باشد، بلکه باید از مرحله اول بر «زنده نگه‌داشتن» میکروارگانیسم در محیط هدف متمرکز شود.

۶.۲. محدودیت مقاومت پرتوزا در PGPRها: ضرورت مهندسی یا شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم

اگرچه برخی باکتری‌های اکستروموفیل مانند *Deinococcus radiodurans* به واسطه سازوکارهای منحصربه‌فرد ترمیم DNA و پایداری پروتئین‌ها مقاومت استثنائی در برابر پرتوهای یونیزان نشان می‌دهند، بیشتر PGPRهای رایج مانند *Pseudomonas*، *Bacillus* و *Azospirillum* فاقد چنین قابلیت‌هایی هستند. این عدم مقاومت ذاتی در برابر پرتوزایی بالا، توان بالقوه آن‌ها را برای عملکرد مؤثر در شرایط پرتوزا به شدت محدود می‌کند. [۷۰]

در پاسخ به این چالش، مهندسی ژنتیک به عنوان رویکردی امیدبخش برای ارتقای مقاومت رادیویی PGPRها مطرح شده است. این استراتژی شامل انتقال ژن‌های کلیدی از باکتری‌های مقاوم مانند *D. radiodurans* به PGPRهای کاربردی می‌شود تا ویژگی‌هایی نظیر مقاومت به تشعشع، توانایی سم‌زدایی یا تجمع رادیونوکلئیدها در آن‌ها القا شود. با این حال، استفاده از میکروارگانیسم‌های مهندسی شده ژنتیکی (GEMs) در محیط‌های طبیعی با چالش‌های جدی مواجه است. مهم‌ترین این نگرانی‌ها شامل پایداری ژنتیکی پایین، رقابت‌پذیری ضعیف در برابر میکروبیوتای بومی، و خطرات اکولوژیکی و بهداشتی احتمالی (مانند کاهش تنوع زیستی یا اثرات پیش‌بینی نشده بر سلامت انسان) هستند. [۶۴-۶۶]



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

این وضعیت یک دوگانگی آشکار ایجاد می‌کند: از یک سوء، مهندسی ژنتیک می‌تواند بر محدودیت‌های ذاتی PGPR ها غلبه کند؛ و از سوی دیگر، ممکن است خود منبع پیچیدگی‌های زیست‌محیطی و اخلاقی شود. از این‌رو، هرگونه پیشنهاد برای استفاده از GEMs در سیستم‌های فیتوپالایی پرتوزا باید با ارزیابی دقیق ریسک، نظارت بلندمدت، و تحلیل‌های چندوجهی همراه باشد. [۶۶]

به‌عنوان جایگزین یا مکمل، شناسایی طبیعی PGPRهای پرتوزاپالا از طریق بیوپراسپکتینگ در زیست‌بوم‌های پرتوزا (مانند مناطقی با آلودگی اتمی یا معادن اورانیوم) می‌تواند راهکاری ایمن‌تر و سازگارتر با اکوسیستم باشد. افزون بر این، به‌کارگیری محدود و کنترل‌شده GEMها در محیط‌های مهارشده می‌تواند مرحله‌ای واسط برای اعتبارسنجی ایمنی و کارایی آن‌ها در شرایط واقعی باشد. رویکردهای آینده‌نگر در این زمینه باید ضمن بهره‌گیری از توانایی‌های مهندسی، ملاحظات اکولوژیکی و اجتماعی را نیز به‌طور جدی در طراحی استراتژی‌های عملکرد دوگانه لحاظ کنند. [۶۶]

۶.۳. کمبود مطالعات بلندمدت در ریزوسفر پرتوزا: یک خلأ اساسی در امکان‌سنجی کاربردی

مطالعات حاضر درباره کاربرد PGPR در پاکسازی فلزات سنگین – و به‌طور محدودتر، رادیونوکلئیدها – اغلب در محیط‌های آزمایشگاهی کنترل‌شده (مانند گلدان یا گلخانه) انجام‌شده‌اند. در مقابل، داده‌های حاصل از آزمایش‌های میدانی بلندمدت در شرایط واقعی، به‌ویژه در محیط‌های پرتوزا، به‌شدت محدود یا اساساً غایب‌اند. این در حالی است که ریزوسفر به‌عنوان منطقه اصلی تعامل گیاه-میکروب، اکوسیستمی پیچیده و دینامیک است که تحت تأثیر عواملی چون ترکیب خاک، pH، رطوبت، حضور سایر میکروارگانیسم‌ها و چرخه‌های فصلی قرار دارد. [۶۸]

در شرایط پرتوزا، این پیچیدگی‌ها با اثرات مزمن پرتوهای یونیزان – نظیر تخریب ساختار جامعه میکروبی، اختلال در سیگنالینگ گیاه-میکروب، و افت عملکرد کلونی‌های PGPR – بیش از پیش تشدید می‌شوند. از سوی دیگر، فیتوپالایی ذاتاً فرایندی زمان‌بر است که نیازمند بقاء، پایداری عملکرد و تعاملات بلندمدت در ریزوسفر است. با این حال، شواهد تجربی درباره بقای پایدار PGPRهای تلقیح‌شده، پایداری کلونیزاسیون و کارایی بلندمدت عملکرد دوگانه در چنین محیط‌هایی هنوز به‌صورت سیستماتیک ارائه نشده است. [۶۸]

برای عبور از این مانع، لازم است تحقیقات آینده از سطح آزمایش‌های کوتاه‌مدت به طراحی مطالعات بلندمدت و چند فصلی در محیط‌های نیمه‌طبیعی یا میدانی با پرتوزایی کنترل‌شده گسترش یابد. این مطالعات باید از فناوری‌های نوین همچون متا-اومیکس، تصویربرداری ریزمقیاس و سنجش‌های پیشرفته تعاملی برای رصد دقیق تغییرات عملکردی و ساختاری بهره بگیرند. بدون چنین داده‌هایی، نه‌تنها امکان‌سنجی فنی، بلکه ارزیابی پایداری زیست‌محیطی استفاده از PGPR در پاکسازی پرتوزا در مقیاس بزرگ همچنان غیرقطعی باقی خواهد ماند. این خلأ دانش، شاید اساسی‌ترین مانع در مسیر گذار از قابلیت مفهومی به کاربرد عملی باشد. [۶۸]

۷. جمع‌بندی و مسیرهای آینده پژوهش: چارچوبی برای تحقق عملکرد دوگانه PGPRها در زیست‌پالایی

پرتوزا

PGPRها از منظر مفهومی، شریکان زیستی امیدوارکننده‌ای برای دستیابی به عملکرد دوگانه – یعنی ارتقای رشد گیاه و پاکسازی همزمان آلاینده‌ها – در محیط‌های آلوده به رادیونوکلئیدها محسوب می‌شوند. [۷۱] مکانیسم‌هایی نظیر تولید سیدروفورها، ترشح اسیدهای آلی، تنظیم تنش اکسیداتیو، و تشکیل بیوفیلم، شواهدی از این پتانسیل را ارائه می‌دهند. [۷۲] با این حال، تحقق این عملکرد در شرایط واقعی پرتوزا، با موانع اساسی مانند تأثیرات ژنوتوکسیک پرتوهای یونیزان، کمبود مقاومت ذاتی در اکثر PGPRهای شناخته‌شده، و پیچیدگی‌های تعاملات بلندمدت در ریزوسفر مواجه است.



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

بررسی‌ها نشان می‌دهد که درک موجود عمدتاً بر قیاس با مطالعات فلزات سنگین و مشاهدات نظری استوار است و داده‌های تجربی مستقیمی که عملکرد همزمان را تحت شرایط رادیواکتیو مزن نشان دهند، نادر و پراکنده هستند. [۷۳] علاوه بر این، چالش‌های عملی مانند پایداری بلندمدت، مدیریت زیست‌توده آلوده، و ارزیابی ریسک‌های زیست‌محیطی ناشی از GEM ها، گذار از مفهوم به کاربرد را محدود می‌سازند [۴۲].

برای پر کردن این شکاف‌ها، یک چارچوب مفهومی یکپارچه باید طراحی شود که عوامل زیستی (ویژگی‌های PGPR و مکانیسم‌های مقاومت پرتوزا)، شیمیایی (رفتار رادیونوکلئیدها)، و اکولوژیکی (تعاملات ریزوسفری تحت استرس مزن) را در کنار هم تحلیل کند. این چارچوب باید هدایتگر طراحی مدل‌های تجربی دقیق و فرضیه‌محور باشد که موارد زیر را پوشش دهند:

- ارزیابی عملکرد همزمان جذب / تبدیل رادیونوکلئید و ارتقای زیست‌توده گیاه
- بررسی پایداری و بقاء بلندمدت PGPR ها در ریزوسفر پرتوزا
- تحلیل تعاملات گیاه-میکروب در مقیاس‌های زمانی واقعی
- توسعه استراتژی‌های ایمن و پایدار برای مدیریت زیست‌توده آلوده

همچنین، پژوهش‌های آینده باید از داده‌های مقطعی و آزمایشگاهی فراتر رفته و به‌سوی مطالعات میدانی طولانی‌مدت با روش‌های چند مقیاسی (مانند متا-اومیکس، ردیابی ایزوتوپی، تصویربرداری دینامیک) حرکت کنند. [۷۴] این مطالعات، شواهد لازم برای اعتبارسنجی عملکرد دوگانه PGPR ها در شرایط واقعی را فراهم می‌کنند و می‌توانند مسیر توسعه کنسرسیوم‌های بهینه گیاه-میکروب، غربالگری سویه‌های مقاوم بومی، و طراحی مداخلات مهندسی‌شده با حداقل ریسک اکولوژیکی را هموار کنند.

در نهایت، موفقیت زیست‌پالایی رادیونوکلئیدها باید بر پایه درکی چندوجهی از کارایی عملکردی، پایداری اکولوژیکی، ایمنی اجتماعی و دوام مدیریتی بنا شود. چنین دیدگاهی، مسیر پژوهش‌های آینده را نه به‌عنوان صرفاً توسعه ابزارهای پاکسازی، بلکه به‌عنوان طراحی سامانه‌های زیستی هوشمند و پایدار تعریف خواهد کرد.

۱۲. مراجع

۱. Prakash, D., et al., *Bioremediation: a genuine technology to remediate radionuclides from the environment*. Microbial Biotechnology, 2013. 6(4): p. 349-360.
۲. Williamson, A.J., M. Binet, and C. Sergeant, *Radionuclide biogeochemistry: From bioremediation toward the treatment of aqueous radioactive effluents*. Critical Reviews in Biotechnology, 2024. 44(4): p. 698-716.
۳. Gupta, R., et al., *Plant growth-promoting Rhizobacteria (PGPR) assisted bioremediation of Heavy Metal Toxicity*. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2024. 196(5): p. 2928-2956.
۴. Kuiper, I., et al., *Rhizoremediation: a beneficial plant-microbe interaction*. Molecular plant-microbe interactions, 2004. 17(1): p. 6-15.
۵. Al-Masri, M., et al., *The Impact of Inoculation of Two Strains of Rhizobacteria on Radionuclide Transfer in Sesbania Grandiflora*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2024. 112(5): p. 65.



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

۶. Singh, G., et al., *Phytoremediation of radioactive elements, possibilities and challenges: special focus on agricultural aspects*. International Journal of Phytoremediation, 2023. **25**(1): p. 1-8.
۷. Qin, H., et al., *Role of plant-growth-promoting rhizobacteria in plant machinery for soil heavy metal detoxification*. Microorganisms, 2024. **12**(4): p. 700.
۸. Piqué, A., et al., *Conceptual and numerical modeling of radionuclide transport and retention in near-surface systems*. Ambio, 2013. **42**: p. 476-487.
۹. Iqbal, M.Z., K. Singh, and R. Chandra, *Recent advances of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) for eco-restoration of polluted soil*. Cleaner Engineering and Technology, 2024: p. 100845.
۱۰. Lloyd, J.R. and J.C. Renshaw, *Microbial transformations of radionuclides: fundamental mechanisms and biogeochemical implications*. Metal Ions In Biological Systems, Volume 44 :۲۰۰۵, p. 205-240.
۱۱. Nayak, T., I. Sengupta, and P.K. Dhal, *A new era of radiation resistance bacteria in bioremediation and production of bioactive compounds with therapeutic potential and other aspects: An in-perspective review*. Journal of Environmental Radioactivity, 2021. **237**: p. 106696.
۱۲. Lopez-Fernandez, M., et al., *Microbial interaction with and tolerance of radionuclides: underlying mechanisms and biotechnological applications*. Microbial Biotechnology, 2021. **14**(3): p. 810-828.
۱۳. Hufton, J., et al., *The importance of the bacterial cell wall in uranium (VI) biosorption*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2021. **23**(2): p. 1566-1576.
۱۴. Moll, H., et al., *Plutonium interaction studies with the Mont Terri Opalinus Clay isolate Sporomusa sp. MT-2 :۹۹.changes in the plutonium speciation by solvent extractions*. Environmental Science and Pollution Research, 2017. **24**: p. 13497-13508.
۱۵. Lovley, D.R., et al., *Microbial reduction of uranium*. Nature, 1991. **350**(6317): p. 413-416.
۱۶. Newsome, L., et al., *Microbial reduction of uranium (VI) in sediments of different lithologies collected from Sellafield*. Applied geochemistry, 2014. **51**: p. 55-64.
۱۷. Liu, C.-J., et al., *Applications of bioremediation and phytoremediation in contaminated soils and waters :CREST publications during 2018–2022*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2023. **53**(6): p. 723-732.
۱۸. Neu, M.P., H. Boukhalfa, and M.L. Merroun, *Biomineralization and biotransformations of actinide materials*. MRS bulletin, 2010. **35**(1): p. 849-857.
۱۹. Shan, B., et al., *A review on mechanism of biomineralization using microbial-induced precipitation for immobilizing lead ions*. Environmental Science and Pollution Research, 2021. **28**(24): p. 30486-30498.
۲۰. Beazley, M.J., et al., *Uranium biomineralization as a result of bacterial phosphatase activity: insights from bacterial isolates from a contaminated subsurface*. Environmental science & technology, 2007. **41**(16): p. 5701-5707.
۲۱. Shukla, S.K., A. Khan, and T.S. Rao, *Biofilm extracellular polymeric substances-based bioremediation of radionuclides*, in *Microbial and natural macromolecules*. 2021, Elsevier. p. 751-773.



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

۲۲. Chandramohan, A., et al., *Novel mechanism for surface layer shedding and regenerating in bacteria exposed to metal-contaminated conditions*. *Frontiers in microbiology*, 2019. **9**: p. 3210.
۲۳. Slade, D. and M. Radman, *Oxidative stress resistance in Deinococcus radiodurans*. *Microbiology and molecular biology reviews*, 2011. **75**(1): p. 133-191.
۲۴. Han, J.M., et al., *Radiation-Resistant Bacteria Deinococcus radiodurans-Derived Extracellular Vesicles as Potential Radioprotectors*. *Advanced Healthcare Materials*, 2024: p. 2403192.
۲۵. Barkay, T. and J. Schaefer, *Metal and radionuclide bioremediation: issues, considerations and potentials*. *Current opinion in microbiology*, 2001. **4**(3): p. 318-323.
۲۶. Cox, M.M. and J.R. Battista, *Deinococcus radiodurans—the consummate survivor*. *Nature Reviews Microbiology*, 2005. **3**(11): p. 882-892.
۲۷. Daly, M.J., et al., *Accumulation of Mn (II) in Deinococcus radiodurans facilitates gamma-radiation resistance*. *Science*, 2004. **306**(5698): p. 1025-1028.
۲۸. Brim, H., et al., *Engineering Deinococcus radiodurans for metal remediation in radioactive mixed waste environments*. *Nature biotechnology*, 2000. **18** : (۱) p. 85-90.
۲۹. Fredrickson, J.K., et al., *Geomicrobiology of high-level nuclear waste-contaminated vadose sediments at the Hanford Site, Washington State*. *Applied and environmental microbiology*, 2004. **70**(7): p. 4230-4241.
۳۰. John, S.G., et al., *Siderophore mediated plutonium accumulation by Microbacterium flavescens (JG-9)*. *Environmental science & technology*, 2001. **35**(14): p. 2942-2948.
۳۱. Merino, N., et al., *Microbial community dynamics and cycling of plutonium and iron in a seasonally stratified and radiologically contaminated pond*. *Scientific Reports*, 2023. **13**(1): p. 19697.
۳۲. Manobala, T., et al., *A new uranium bioremediation approach using radio-tolerant Deinococcus radiodurans biofilm*. *Journal of biosciences*, 2019. **44**: p. 1-9.
۳۳. Chen, F., et al., *Deinococcus radiodurans exopolysaccharide inhibits Staphylococcus aureus biofilm formation*. *Frontiers in microbiology*, 2021. **12**: p. 712086.
۳۴. Singh, A., et al., *Enhancing plant growth promoting rhizobacterial activities through consortium exposure :A review*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2023. **11**: p. 1099999.
۳۵. Han, L., *Harnessing the power of PGPR: Unraveling the molecular interactions between beneficial bacteria and crop roots*. *Molecular Soil Biology*, 2024. **15**.
۳۶. Sahoo, R., et al., *Unveiling the potential of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in phytoremediation of heavy metal*. *Discover Applied Sciences*, 2024. **6**(6): p. 324.
۳۷. Etesami, H. and D.K. Maheshwari, *Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects*. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018. **156**: p. 225-246.
۳۸. Al-Turki, A., et al., *Recent advances in PGPR-mediated resilience toward interactive effects of drought and salt stress in plants*. *Frontiers in microbiology*, 2023. **14**: p. 1214845.



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

- ۳۹ Ehinmitan, E., et al., *BioSolutions for Green Agriculture: Unveiling the Diverse Roles of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*. International Journal of Microbiology, 2024. **2024**(1): p. 6181491.
- ۴۰ Giannelli, G., S. Potestio, and G. Visioli, *The contribution of PGPR in salt stress tolerance in crops: Unravelling the molecular mechanisms of cross-talk between plant and bacteria*. Plants, 2023. **12**(11): p. 2197.
- ۴۱ Khoso, M.A., et al., *Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective*. Plant Stress, 2024. **11**: p. 100341.
- ۴۲ Sun, W., M.H. Shahrajabian, and A. Soleymani, *The roles of plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR)-based biostimulants for agricultural production systems*. Plants, 2024. **13**(5): p. 613.
- ۴۳ Lucas, J.A., et al., *Physiological and genetic modifications induced by plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in tomato plants under moderate water stress*. Biology, 2023. **12**(7): p. 901.
- ۴۴ Batool, T., et al., *Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities*. Scientific Reports: (۱)۱۰. ۲۰۲۰, p. 16975.
- ۴۵ Oubohssaine, M., L. Sbabou, and J. Aurag, *Native heavy metal-tolerant plant growth promoting rhizobacteria improves *Sulla spinosissima* (L.) growth in post-mining contaminated soils*. Microorganisms, 2022. **10**(5): p. 838.
- ۴۶ Timofeeva, A.M., M.R. Galyamova, and S.E. Sedykh, *Plant growth-promoting soil bacteria: Nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities*. Plants, 2023. **12**(24): p. 4074.
- ۴۷ Edberg, F., et al., *Mobilization of metals from uranium mine waste: the role of pyoverdines produced by *Pseudomonas fluorescens**. Geobiology, 2010. **8**(4): p. 278-292.
- ۴۸ Manoj, S.R., et al., *Understanding the molecular mechanisms for the enhanced phytoremediation of heavy metals through plant growth promoting rhizobacteria: A review*. Journal of environmental management, 2020. **254**: p. 109779.
- ۴۹ Fredrickson, J.K., et al., *Reduction of fe (III), cr (VI), U (VI), and tc (VII) by *Deinococcus radiodurans* R1*. Applied and Environmental Microbiology, 2000. **66**(5): p. 2006-2011.
- ۵۰ Salbu, B., O. Lind, and L. Skipperud, *Radionuclide speciation and its relevance in environmental impact assessments*. Journal of Environmental Radioactivity, 2004. **74**(1-3): p. 233-242.
- ۵۱ Ramani, K.V., K.G. Dangar, and D.B. Changela, *Exploring the potential of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in phytoremediation*, in *Phytoremediation for Environmental Sustainability*. 2022, Springer. p. 467-484.
- ۵۲ Ullah, A., et al., *Phytoremediation of heavy metals assisted by plant growth promoting (PGP) bacteria: a review*. Environmental and Experimental Botany, 2015. **117**: p. 28-40.
- ۵۳ Badodekar, P., *The potential of PGPR in bioremediation of soils with heavy metal contamination*. International Journal of Agricultural and Applied Sciences, 2021.



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

- ۵۴ Wang, Y., et al., *Plant growth-promoting bacteria in metal-contaminated soil: Current perspectives on remediation mechanisms*. *Frontiers in Microbiology*, 2022. **13**: p. 966226.
- ۵۵ Khatoon, Z., M.d.C. Orozco-Mosqueda, and G. Santoyo, *Microbial contributions to heavy metal phytoremediation in agricultural soils: A review*. *Microorganisms*, 2024. **12**(10): p. 1945.
- ۵۶ Riseh, R.S., et al., *Bioremediation of heavy metals by rhizobacteria*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2023. **195** :(^)p. 4689-4711.
- ۵۷ Azzam, E.I., J.-P. Jay-Gerin, and D. Pain, *Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury*. *Cancer letters*, 2012. **327**(1-2): p. 48-60.
- ۵۸ Zhu, Y., et al., *Plant growth-promoting rhizobacteria: A good companion for heavy metal phytoremediation*. *Chemosphere*, 2023. **338**: p. 139475.
- ۵۹ Khan, A., et al., *Radiation-resistant bacteria in desiccated soil and their potentiality in applied sciences*. *Frontiers in Microbiology*, 2024. **15**: p. 1348758.
- ۶۰ Prakash, J., *Plant growth promoting rhizobacteria in phytoremediation of environmental contaminants: challenges and future prospects*. *Bioremediation for Environmental Sustainability*, 2021: p. 191-218.
- ۶۱ Yan, A., et al., *Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land*. *Frontiers in plant science*, 2020. **11**: p. 513099.
- ۶۲ Wijekoon, W., et al., *Review and prospects of phytoremediation: Harnessing biofuel-producing plants for environmental remediation*. *Sustainability*, 2025. **17**(3): p. ۸۲۲.
- ۶۳ Mukherjee, S., et al., *Sustainable management of post-phytoremediation biomass*. *Energy, Ecology and Environment*, 2025: p. 1-35.
- ۶۴ Tan, J.P., et al., *Advancements in microbial-mediated radioactive waste bioremediation: A review*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2024. **280**: p. 107530.
- ۶۵ Kumar, R., S. Singh, and O.V. Singh, *Bioremediation of radionuclides: emerging technologies*. *Omicron: a journal of integrative biology*, 2007. **11**(3): p. 295-304.
- ۶۶ Etesami, H., *The dual nature of plant growth-promoting bacteria: Benefits, risks, and pathways to sustainable deployment*. *Current Research in Microbial Sciences*, 2025: p. 100421.
- ۶۷ Shuryak, I., *Review of microbial resistance to chronic ionizing radiation exposure under environmental conditions*. *Journal of environmental radioactivity*, 2019. **196**: p. 50-63.
- ۶۸ Mohammad, R.E.A., et al., *Tackling Environmental Radionuclides Contamination: A Systematic Review of Chemical, Biological, and Physical Remediation Strategies*. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2025: p. 100802.
- ۶۹ Zhang, J., et al., *The translationally controlled tumor protein and the cellular response to ionizing radiation-induced DNA damage*. *TCTP/tpt1-Remodeling Signaling from Stem Cell to Disease*, 2017: p. 227-253.
- ۷۰ Li, S., et al., *Application progress of deinococcus radiodurans in biological treatment of radioactive uranium-containing wastewater*. *Indian Journal of Microbiology*, 2021. **61**(4): p. 417-426.
- ۷۱ Vocciante, M., et al., *The role of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in mitigating plant's environmental stresses*. *Applied sciences*, 2022. **12**(3): p. 1231.



دانشجویان علوم پایه ایران 4th International Conference of Iranian Basic Science Students

- .۷۲ Ahmed, E. and S.J. Holmström, *Siderophores in environmental research: roles and applications*. Microbial biotechnology, 2014. **7**(3): p. 196-208.
- .۷۳ Rao, M.C.S., et al., *Enhancing the phytoremediation of heavy metals by plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) consortium: a narrative review*. Journal of Basic Microbiology, 2025. **65**(4): p. e2400529.
- .۷۴ Mmotla, K., et al., *Exploring the intricacies of plant growth promoting rhizobacteria interactions: an omics review*. Annals of Microbiology, 2025. **75**(1): p. 5.