

اثر کشت مخلوط بر میزان انباشت کادمیوم در خاک و گیاه برنج: یک مطالعه مروری

سجاد شاکر کوهی^{۱*}، محمد ربیعی^۲

^۱ کارشناس بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران

^۲ پژوهشگر بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

چکیده

زمینه و هدف: غلظت بالای کادمیوم در خاک‌های شالیزاری و انتقال آن به دانه برنج و زنجیره غذایی یک مشکل جدی زیست‌محیطی است. از این رو، توسعه روش‌هایی برای کاهش تجمع کادمیوم در برنج و حفظ ایمنی مواد غذایی ضروری است. گیاه‌پالایی یک روش مقرون به صرفه برای حذف یا استخراج کادمیوم از محیط آلوده است. کشت مخلوط یکی از تکنیک‌های مؤثر برای افزایش کارایی گیاه‌پالایی کادمیوم در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، هدف از این مطالعه بررسی اثر کشت مخلوط بر میزان انباشت کادمیوم در خاک و گیاه برنج است.

مواد و روش‌ها: جمع‌آوری داده‌های مطالعه حاضر از طریق جستجوی مقالات در پایگاه‌های اطلاعاتی شامل Google Scholar، Elsevier، Scopus، ResearchGate، PubMed، ProQuest، ScienceDirect، Springer بود. در جستجوی اولیه، در مجموع ۶۲ مقاله در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ یافت شد و پس از حذف موارد تکراری، این تعداد به ۴۵ رسید. سپس در مرحله غربالگری، عنوان و چکیده مقالات مورد بررسی قرار گرفت و در انتهای این مرحله تعداد ۲۹ مقاله باقی ماند. در نهایت پس از بررسی متن کامل مقالات، تعداد ۱۹ مقاله برای این مطالعه استفاده شد. جمع‌آوری داده‌های مطالعه حاضر از طریق جستجوی مقالات در پایگاه‌های اطلاعاتی شامل Google Scholar، Elsevier، Scopus، ResearchGate، PubMed، ProQuest، ScienceDirect، Springer بود. در جستجوی اولیه، در مجموع ۶۲ مقاله در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ یافت شد و پس از حذف موارد تکراری، این تعداد به ۴۵ رسید. سپس در مرحله غربالگری، عنوان و چکیده مقالات مورد بررسی قرار گرفت و در انتهای این مرحله تعداد ۲۹ مقاله باقی ماند. در نهایت پس از بررسی متن کامل مقالات، تعداد ۱۹ مقاله برای این مطالعه استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج مطالعات نشان داد که کشت مخلوط ارقام برنج کم انباشته کننده با ارقام برنج بیش انباشته کننده کادمیوم، یک روش سودمند برای اصلاح کادمیوم در خاک‌های شالیزاری است. به طوری که کشت مخلوط با رقم برنج بیش انباشته کننده سبب کاهش محتوای کادمیوم دانه و بهبود عملکرد رقم برنج کم انباشته کننده کادمیوم شد. همچنین کشت مخلوط برنج با اسفناج آبی، سزبانیا، Alligator flag، *Sphagneticola calendulacea*، *Canna indica* و *Pontederia cordata* می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر برای اصلاح کادمیوم عمل کرده و ایمنی دانه برنج را تضمین کند.

نتیجه‌گیری: کشت مخلوط برنج با گیاهان بیش انباشته کننده یک روش کارآمد برای دستیابی به تولید ایمن برنج و گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به کادمیوم است.

واژه‌های کلیدی: برنج، بیش انباشته کننده، کادمیوم، کشت مخلوط، گیاه‌پالایی

مقدمه

خاک به عنوان یک عنصر طبیعی حیاتی و منبع ارزشمند کشاورزی، برای بقای انسان ضروری است. خاک سالم اهمیت زیادی در تضمین ایمنی مواد غذایی دارد.^۱ آلودگی خاک به فلزات سنگین به دلیل فعالیت‌های بشر به طور قابل ملاحظه‌ای در دهه‌های اخیر افزایش یافته است.^۲ کادمیوم سومین آلاینده اصلی محیط‌زیست پس از جیوه و سرب می‌باشد و در غلظتی که سمیت گیاهی ندارد، تهدیدی برای سلامتی انسان و حیوانات است.^۳ محتوای کادمیوم در خاک‌های کشاورزی به دلیل رسوب اتمسفر، آبیاری با استفاده از فاضلاب و کاربرد آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی، افزایش یافته است.^۴ کادمیوم در خاک سطحی زمین‌های کشاورزی که در معرض لجن فاضلاب قرار گرفته‌اند تجمع می‌یابد و غلظت آن به‌ویژه در مناطق معدنی زیاد می‌باشد.^۵ این فلز به دلیل ماهیت غیرضروری خود سبب تغییرات زیان‌بار متعددی در فیزیولوژی، بیوشیمی و مورفولوژی گیاهان، حتی در غلظت‌های پایین می‌شود.^۶ کاهش رشد و نمو، کلروز و نهایتاً مرگ گیاهان، بحرانی‌ترین علائم مشاهده شده تحت سمیت کادمیوم است.^۷ علاوه بر این، کادمیوم می‌تواند منجر به تجمع گونه‌های اکسیژن فعال در گیاه شده و ساختار و عملکرد غشای سلولی را از بین ببرد و جذب مواد مغذی را مختل کند.^۸

آلودگی کادمیوم در زنجیره غذایی با انتقال آن به خاک و سپس به گیاه شروع می‌شود. کشت محصولات زراعی در خاک‌های آلوده به کادمیوم می‌تواند سبب تجمع بالای فلز در دانه‌ها و قسمت‌های خوراکی گیاهان شود و ایمنی غذایی و سلامت انسان را تهدید کند.^۹ مصرف طولانی مدت کادمیوم منجر به بیماری‌های مزمن مانند آسیب‌های کلیوی، پوکی استخوان، بیماری‌های قلبی عروقی و سرطان می‌شود.^{۱۰} در نتیجه، اصلاح خاک‌های آلوده به کادمیوم و کاهش محتوای آن در محصولات زراعی ضروری است. در میان تمام روش‌های پالایش فلزات سنگین، گیاه‌پالایی (به‌ویژه استفاده از گونه‌های بیش انباشته کننده) به دلیل

کارایی اقتصادی و سازگاری با محیط‌زیست از طریق حفظ حاصلخیزی و ساختار خاک و عدم ایجاد آلودگی ثانویه، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.^{۱۱} مکانیسم‌های اصلی گیاه‌پالایی شامل استخراج گیاهی، تثبیت گیاهی و تبخیر گیاهی هستند.^{۱۲}

اصلاح زمین‌های کشاورزی آلوده به فلزات سنگین با استفاده از محصولات زراعی ممکن است یک تهدید بالقوه برای سلامتی انسان ایجاد کند.^{۱۳} بنابراین امکان استفاده از محصولاتی که فلزات سنگین را در سطوح پایین در قسمت‌های خوراکی و در سطوح بالا در قسمت‌های غیرخوراکی خود انباشته می‌کنند، برای حذف آلاینده‌های فلزی از خاک‌های کشاورزی مورد بحث قرار گرفته است.^{۱۴} از طرف دیگر، استفاده از گونه‌های بیش انباشته کننده در مقیاس بزرگ به دلیل زیست‌توده کم، رشد کند و فراهمی زیستی کم فلزات در خاک، هنوز محدود است.^{۱۵} کشت مخلوط نه تنها منجر به تولید ایمن محصولات می‌شود، بلکه باعث اصلاح خاک‌های آلوده، بهینه‌سازی محیط خاک و استفاده کامل از منابع طبیعی می‌شود.^{۱۶} در سال‌های اخیر استفاده از سیستم کشت مخلوط با ترکیبی از گیاهان بیش انباشته کننده و گیاهان کم انباشته کننده برای کارایی بهتر اصلاح فلزات سنگین در زمین‌های کشاورزی، پیشنهاد شده است.^{۱۷} در کشت مخلوط یک گیاه زراعی (گیاه اصلی) با یک گیاه بیش انباشته کننده، برهم‌کنش متقابل ریشه‌ای گونه‌ها سبب بهبود اصلاح خاک و در نتیجه کاهش جذب فلزات سنگین توسط محصول اصلی می‌شود.^{۱۸}

برنج یکی از مهم‌ترین غلات جهان است، به طوری که عملکرد و کیفیت آن ارتباط نزدیکی با امنیت غذایی دارد.^{۱۹} خاک‌های شالیزاری به علت شرایط غرقابی طولانی مدت، زهکشی و کشت متوالی برنج، در مقایسه با سایر خاک‌ها خصوصیات متفاوتی دارند. به همین دلیل، انتقال و تجمع فلزات سنگین در اکوسیستم شالیزار پیچیده است.^{۲۰} گیاه برنج نسبت به سایر غلات تمایل بیشتری به تجمع فلزات سنگین از جمله کادمیوم دارد.^{۲۱} در نتیجه تولید برنج با

چالش‌های ناشی از آلودگی کادمیوم در مزارع مواجهه است که بر کیفیت و ایمنی محصول تأثیر می‌گذارد و خطراتی را برای سلامتی انسان به همراه دارد.^{۲۲} بنابراین، موضوع آلودگی مزارع با کادمیوم توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است و باید راهکارهایی جهت رفع این مشکل بدون کاهش تولید برنج پیدا کرد.

اکوفیزیولوژی جذب کادمیوم در برنج

فراهمی زیستی و سمیت کادمیوم در خاک به خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک بستگی دارد.^{۲۳} غلظت کادمیوم در اندام‌های برنج با pH خاک همبستگی منفی دارد. به‌طوری‌که pH پایین خاک سبب کاهش جذب یون کادمیوم (Cd^{+2}) روی اجزای خاک و افزایش حلالیت آن در محلول خاک می‌شود و در نتیجه جذب کادمیوم توسط گیاه بیشتر می‌شود.^{۲۴} کاهش pH خاک در هر واحد، انحلال‌پذیری کادمیوم را چهار تا پنج برابر افزایش می‌دهد.^{۲۵} تنظیم پتانسیل ردوکس خاک به کنترل حلالیت کادمیوم کمک می‌کند. محققان گزارش کردند که کشف محدوده بهینه pH و پتانسیل ردوکس خاک برای محدود کردن جذب کادمیوم توسط برنج در شالیزارهای آلوده مهم است.^{۲۶} میکروارگانیزم‌های خاک جزء حیاتی اکوسیستم خاک هستند که بر کیفیت خاک و رشد گیاه تأثیر می‌گذارند. میکروب‌های خاک از طریق ترشح هورمون‌ها یا تحریک گیاهان برای تولید هورمون، به مبارزه با پاتوژن‌های گیاهی، افزایش تحمل در برابر تنش‌ها و رشد گیاه کمک می‌کنند. افزایش فعالیت میکروبی خاک می‌تواند جذب کادمیوم در برنج را کاهش دهد.^{۲۷} میکروب‌ها نه تنها به کاهش محتوای کادمیوم ریشه، اندام هوایی و دانه برنج کمک می‌کنند، بلکه سبب افزایش غلظت مواد مغذی ضروری به‌ویژه آهن و منگنز می‌شوند که انتقال کادمیوم را از طریق کانال‌های کاتیونی به شیوه‌ای رقابتی محدود می‌کند.^{۲۸}

غلظت کادمیوم در دانه برخی از ارقام برنج به‌طور قابل‌توجهی کمتر از سایر ارقام است.^{۲۹} و^{۱۴} ارقام برنج با تلفات بالای اکسیژن شعاعی (ROL)،^۱ ظرفیت بیشتری برای محدود کردن انتقال کادمیوم به دانه دارند.^{۳۰} ارقامی که اکسیژن را در ریزوسفر آزاد می‌کنند، از طریق تشکیل اکسی هیدروکسید آهن سبب سم‌زدایی کادمیوم می‌شوند.^{۳۱} تشکیل پلاک‌های آهن روی سطح ریشه به‌عنوان یک مانع در برابر جذب کادمیوم توسط ریشه عمل می‌کند.^{۳۲} بنابراین، تجمع، جذب و انتقال کادمیوم در اکوسیستم شالیزار به عوامل بسیاری مانند ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، میکروارگانیزم‌های خاک، ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه برنج و انواع ارقام آن بستگی دارد.^{۳۳}

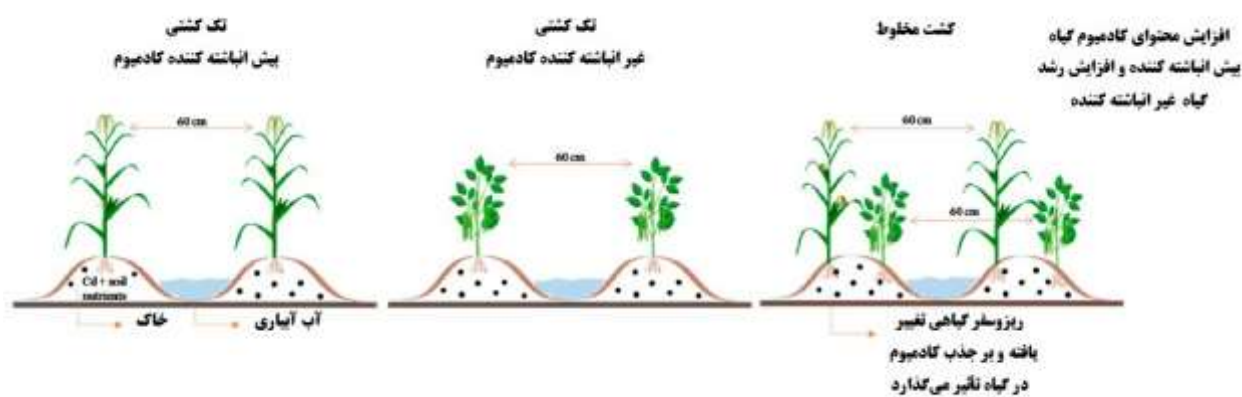
اثر کشت مخلوط بر فراهمی زیستی کادمیوم

کشت مخلوط به کشت دو یا چند محصول به‌طور هم‌زمان در یک سال اطلاق می‌شود. در سیستم‌های مخلوط، گیاهان مختلف از طریق رقابت برای مواد مغذی، آب، نور و سایر منابع با یکدیگر تعامل دارند.^{۳۴} علاوه بر این، کشت مخلوط با تغییر خواص شیمیایی خاک مانند اسیدهای آلی دفع شده توسط ریشه، pH و پتانسیل ردوکس خاک، فراهمی زیستی و تحرک فلزات سنگین در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد.^{۳۵} همچنین، کشت مخلوط بر جذب و انتقال عناصر سنگین در گیاهان تأثیر می‌گذارد.^{۳۶} باین‌حال، در تحقیقات گذشته سه حالت در مورد جذب فلزات سنگین در سیستم‌های کشت مخلوط گزارش شده است. در حالت اول غلظت فلزات سنگین در هر دو گونه کشت مخلوط افزایش یافته است.^{۳۷} در حالت دوم تغییر معنی‌داری رخ نداده است.^{۳۸} و در حالت سوم غلظت فلزات در یک گونه افزایش ولی در گونه دیگر کاهش یافته است.^{۳۹} گیاهان در کشت مخلوط ریزوسفر را به اشتراک می‌گذارند و در نتیجه فراهمی زیستی کادمیوم را برای گونه مجاور تغییر می‌دهند.

1- Radial oxygen loss

در برخی از تجمع دهنده‌ها افزایش دهد، درحالی‌که تجمع این فلزات را در گیاهان هدف کاهش دهد^{۴۳} و^{۴۴}. گیاهان بیش انباشته کننده در کشت مخلوط می‌توانند کادمیوم بیشتری را از خاک جذب کرده و در نتیجه جذب و تجمع این فلز را در گیاهان غیر انباشته کننده کاهش دهند (شکل ۱). بنابراین، کشت مخلوط بین گیاهان زراعی و گیاهان بیش انباشته کننده یک استراتژی جدید برای تولید محصولات ایمن و گیاه‌پالایی در خاک آلوده به کادمیوم است^{۴۵}.

Li و همکاران (۲۰۰۹)^{۴۶} غلظت بالاتر کادمیوم در ذرت (۵/۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) تحت کشت مخلوط با حبوبات نسبت به کشت مخلوط این گیاه با غیر حبوبات (۲/۴۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) را گزارش کردند. به‌طور مشابه، جذب بیشتر کادمیوم در سایر محصولات کشت شده با حبوبات نیز مشاهده شده است^{۴۱} و^{۴۲}. بنابراین، غلظت کادمیوم گیاهان در سیستم مخلوط به انتخاب ترکیبات گیاهی بستگی دارد. تحقیقات گذشته نشان داد که سیستم مخلوط می‌تواند عملکرد زیست‌توده و توانایی انباشته شدن فلزات سنگین را



شکل ۱- شماتیک کشت مخلوط بین گیاه بیش انباشته کننده و گیاه غیر انباشته کننده کادمیوم^{۴۶}

plumbizincicola، محتوای فلزات سنگین در گندم و خاک با افزایش تراکم *Sedum plumbizincicola* کاهش یافت. نتایج این آزمایش نشان داد که کشت مخلوط گندم با گونه بیش انباشته کننده، سبب بهبود کارایی گیاه‌پالایی فلزات سنگین می‌شود^{۵۰}. Hussein و همکاران (۲۰۱۹)^{۵۱} گزارش کردند که کشت مخلوط گندم و شبلیله از طریق افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب اکسیداتیو، منجر به افزایش مقاومت این گیاهان در برابر فلزات سنگین می‌شود. همچنین در مقایسه با الگوی تک‌کشتی، سیستم مخلوط به‌طور قابل‌توجهی زیست‌توده گونه‌های گیاهی را بهبود بخشید و غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گندم را کاهش داد.

محیط ریزوسفر در سیستم مخلوط نقش مهمی در جذب و تجمع کادمیوم توسط گونه‌های گیاهی دارد. فرآیندهایی مانند ترشحات ریشه‌ای توسط دو گونه گیاهی سبب اثرات متقابل در محیط ریزوسفر می‌شود^{۴۷} و^{۴۸}. اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک، مالیک و اگزالیک از طریق افزایش غلظت کادمیوم قابل‌دسترس در خاک، جذب کادمیوم توسط گیاهان مخلوط را تسهیل می‌کنند^{۴۸}. در تحقیقی گزارش شد که کشت مخلوط بین گیاه بادمجان با دو گونه بیش انباشته کننده کادمیوم (*Solanum* و *Solanum nigrum*) سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش جذب کادمیوم توسط بادمجان در مقایسه با الگوی تک‌کشتی می‌شود^{۴۹}. در آزمایشی دیگر، در کشت مخلوط گندم با گونه بیش انباشته کننده *Sedum*

یافته‌های پژوهش

محققان گزارش کردند که در کشت مخلوط برنج با اسفناج آبی غلظت کادمیوم در اندام‌های برنج به‌طور معنی‌داری نسبت به الگوی تک‌کشتی کاهش یافت. به عبارت دیگر، کشت مخلوط سبب کاهش جذب کادمیوم توسط برنج و افزایش جذب این فلز توسط اسفناج آبی شد. افزایش pH خاک و محتوای پلاک آهن در سطح ریشه برنج از جمله دلایل کاهش غلظت کادمیوم در این گیاه تحت سیستم مخلوط عنوان شد. سیستم مخلوط منجر به کاهش تجمع کادمیوم در دانه برنج، کمتر از آستانه مجاز استاندارد ملی ایمنی غذایی چین شد. با توجه به نتایج این تحقیق، ترتیب انباشتگی کادمیوم در اندام‌های برنج به صورت ریشه < ساقه < برگ < دانه بود. از طرفی، زیست‌توده برنج در سیستم کشت مخلوط به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از سیستم تک‌کشتی بود (جدول ۱). همچنین نسبت برابری حذف فلز^۱ (MRER) برای کادمیوم ۱/۳۴ به دست آمد که بیانگر مزیت کشت مخلوط برنج و اسفناج آبی در حذف کادمیوم می‌باشد^{۵۲}. همسو با این نتایج Yang و همکاران (۲۰۲۰)^{۵۳} در کشت مخلوط برنج با اسفناج آبی مشاهده کردند که کادمیوم کمتری در اندام‌های مختلف برنج نسبت به اسفناج آبی انباشته می‌شود. همچنین سیستم مخلوط باعث افزایش عملکرد برنج شد.

روش کار

در مطالعه مروری حاضر، فقط مقالات نوشته‌شده به زبان انگلیسی مورد بررسی قرار گرفتند. پایگاه‌های اطلاعاتی مورد استفاده شامل Springer، Google Scholar، ScienceDirect، PubMed، ProQuest، Elsevier و Scopus بود. جهت دستیابی به نتایج بهتر کلیدواژه‌های ترکیبی Heavy Intercropping، Rice، Cadmium، metals، Phytoremediation، Accumulation و Hyperaccumulator در پایگاه‌های مذکور جست‌وجو شدند. پس از جست‌وجو، برای این کلیدواژه‌ها در مجموع تعداد ۶۲ مقاله در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ یافت شد که تعداد ۱۷ مقاله به دلیل تکراری بودن عنوان و عدم مطابقت با معیارهای ورود و خروج از بررسی حذف شدند. سپس در مرحله غربالگری، عنوان و چکیده مقالات مورد بررسی قرار گرفت که در انتهای این مرحله تعداد ۲۹ مقاله باقی ماند. در نهایت پس از بررسی متن کامل مقالات، تعداد ۱۹ مقاله ثبت و در مطالعه حاضر استفاده شد.

1- Metal removal equivalent ratio

جدول ۱: اثر کشت مخلوط برنج و اسفناج آبی بر زیست توده، عملکرد دانه و غلظت کادمیوم برنج^{۵۶}

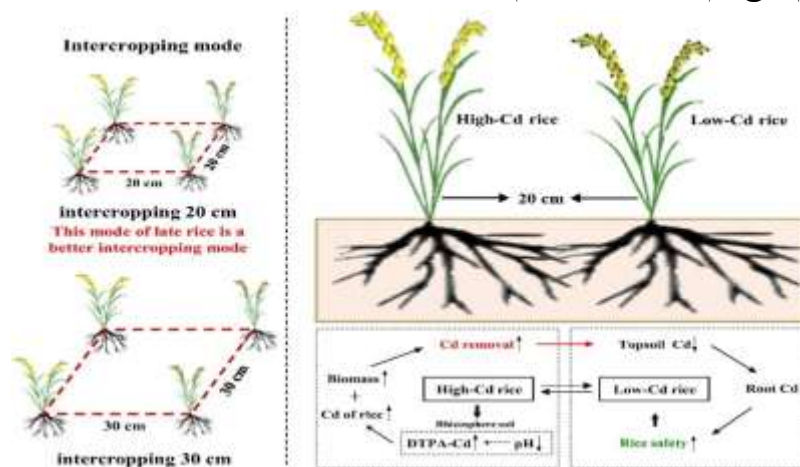
پارامتر	اندام های برنج	سیستم کشت
	کشت خالص برنج	کشت مخلوط
زیست توده (گرم در بوته)	ریشه	۵/۹ ± ۰/۶a
	ساقه	۸۵/۲ ± ۱/۸a
	برگ	۲۷/۳ ± ۱a
	دانه	۵۲/۴ ± ۳/۴a
عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	-	۱۰۱۴۳/۳ ± ۲۷۷/۲a
	ریشه	۴/۴۷ ± ۰/۰۹b
	ساقه	۰/۹۹ ± ۰/۰۶a
	برگ	۰/۶۳ ± ۰/۰۱۰a
غلظت کادمیوم (میلی گرم بر کیلوگرم)	دانه	۰/۱۶ ± ۰/۰۱b
		۰/۲۴ ± ۰/۰۱a

با الگوی تک کشتی هر دو گیاه شد. باین حال، سیستم کشت مخلوط منجر به تولید محصول ایمن برنج نشد، زیرا به طور قابل توجهی محتوای کادمیوم دانه را افزایش داد. همچنین Wu و همکاران (۲۰۰۳)^{۵۵} در کشت مخلوط برنج و گندم مشاهده کردند که غلظت کادمیوم در دانه برنج ۱۲۰ درصد نسبت به الگوی تک کشتی برنج افزایش یافت، در حالی که غلظت کادمیوم در دانه گندم نسبت به الگوی تک کشتی گندم ۴۰/۴ درصد کاهش نشان داد.

در مطالعه ای اصلاح شالیزارهای آلوده به کادمیوم با استفاده از کشت مخلوط ارقام برنج بیش انباشته کننده و کم انباشته کننده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوی کشت مخلوط با فاصله ردیف ۲۰ سانتی متر بهتر از الگوی کشت مخلوط با فاصله ردیف ۳۰ سانتی متر عمل کرد. الگوی کشت مخلوط با فاصله ردیف ۲۰ سانتی متر از طرق کاهش قابل ملاحظه pH خاک و افزایش غلظت کادمیوم قابل استخراج، منجر به انباشت بیشتر کادمیوم در ارقام برنج بیش انباشته کننده شد. در نتیجه، بهبود قابل توجهی در میزان حذف کادمیوم کل خاک (۳۸/۵۵ درصد) مشاهده شد (شکل

Chen و همکاران (۲۰۲۴)^{۵۴} گزارش دادند که در کشت مخلوط برنج (*Oryza sativa* L.) با گیاه ماگورت (*Artemisia argyi* Levl. et Vant.) ریشه ای متقابل دو گونه منجر به افزایش معنی داری در محتوای کادمیوم اندام هوایی، ریشه و دانه برنج و اندام هوایی ماگورت شد. افزایش محتوای کل اسیدهای آلی در ریزوسفر و کاهش pH خاک، مکانیسم احتمالی افزایش جذب کادمیوم در هر دو گونه گیاهی بود. با توجه به نتایج، برهمکنش ریشه ای کامل و جزئی دو گونه در کشت مخلوط سبب افزایش فاکتور تغلیظ زیستی^۲ (BCF) کادمیوم در اندام هوایی، ریشه و دانه برنج در مقایسه با الگوی تک کشتی شد. غلظت زیستی کادمیوم در ریشه برنج تحت اثر متقابل ریشه ای کامل و جزئی و بدون اثر متقابل به ترتیب به ترتیب ۶۱/۰۲، ۵۴/۷۸ و ۸/۳۵ به دست آمد. مقادیر این فاکتور برای دانه برنج به ترتیب ۴/۳۸، ۲/۰۹ و ۰/۴۹ بود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که سیستم کشت مخلوط برنج با ماگورت، جذب کادمیوم توسط برنج را کاهش نداد، اما منجر به استخراج مقادیر زیادی کادمیوم از خاک آلوده در مقایسه

۲). بنابراین، کاهش غلظت کادمیوم کل خاک می‌تواند محیط
بهتری را برای رشد ارقام برنج کم انباشته کننده فراهم کند
و منجر به کاهش غلظت کادمیوم در این ارقام و ایمن تر شدن
آنها برای مصرف شود^{۵۶}.



شکل ۲. شماتیک اثر کشت مخلوط ارقام برنج بر پالایش خاک آلوده به کادمیوم^{۵۶}

جذب بیشتر کادمیوم توسط *S. calendulacea* کارایی
گیاه‌پالایی را بهبود بخشید.

Kang و همکاران (۲۰۲۱)^{۵۹} در کشت مخلوط برنج با
سزبانا (*Sesbania cannabina* L.) به این نتیجه
رسیدند که سیستم کشت مخلوط منجر به کاهش
قابل توجهی در محتوای اسیدهای آلی ریزوسفر (اسیدهای
اگرالیک و مالیک) و افزایش قابل توجهی در pH خاک و
محتوای پلاک آهن در سطح ریشه شد و نهایتاً محتوای
کادمیوم خاک و تجمع آن در اندام‌های برنج را کاهش داد.
به طوری که، غلظت کادمیوم دانه برنج در کشت مخلوط کمتر
از آستانه مجاز استاندارد ملی ایمنی غذایی چین بود.
درعین حال، میزان غلظت زیستی کادمیوم در گیاه سزبانا در
کشت مخلوط به‌طور معنی‌داری (۴۶/۱۵ درصد) افزایش
یافت (جدول ۲). نتایج این آزمایش نشان داد که کشت
مخلوط برنج با سزبانا یک رویکرد کشاورزی امیدوارکننده
و مقرون‌به‌صرفه برای تولید ایمن محصول برنج و گیاه‌پالایی
شالیزارهای آلوده به کادمیوم است.

Xiang و همکاران (۲۰۲۳)^{۵۷} در کشت مخلوط برنج با
گیاهان آبی (*Pontederia cordata* and *Canna indica*)
مشاهده کردند که کشت مخلوط به‌طور
قابل توجهی ارتفاع بوته، تعداد پنجه و زیست‌توده برنج را
بهبود بخشید و از طرفی باعث کاهش غلظت کادمیوم و
فاکتور غلظت زیستی در برنج و گیاهان آبی شد. فاکتور
غلظت زیستی کادمیوم برای دانه برنج در تیمار (۲۵ میلی گرم
کادمیوم بر کیلوگرم خاک) در کشت مخلوط برنج با *C.*
indica و *P. cordata* به ترتیب به میزان ۵۹/۶۵ و ۵۴/۳۹
درصد کاهش یافت. علاوه بر این، در سطوح بالای کادمیوم،
کشت مخلوط از افزایش غلظت زیستی کادمیوم در برنج و
گیاهان آبی جلوگیری کرد. با توجه به نتایج این تحقیق،
کشت مخلوط برنج با گیاهان آبی مورد مطالعه را می‌توان
به‌عنوان یک رویکرد مؤثر برای کاهش آلودگی کادمیوم در
شالیزارها و همچنین به حداقل رساندن تجمع این فلز در
برنج و بهبود ایمنی غذایی در نظر گرفت. Li و همکاران
(۲۰۲۱)^{۵۸} گزارش دادند که کشت مخلوط برنج آپلند
(*upland rice*) با گیاه *Sphagneticola calendulacea* (L.)
توسط برنج سبب تولید ایمن محصول برنج شد و از طریق

جدول ۲: اثر کشت مخلوط بر غلظت کادمیوم و غلظت زیستی کادمیوم در برنج و سزبانا^{۵۹}

گیاه	پارامتر	اندام های برنج	سیستم کشت	کشت مخلوط
برنج	غلظت کادمیوم (میلی گرم بر کیلوگرم)	ریشه	کشت خالص برنج	۷/۸۶ ± ۰/۳۲a
		ساقه		۵/۵۷ ± ۰/۳۵b
		برگ		۱/۸۸ ± ۰/۲۰a
		دانه		۰/۱۷ ± ۰/۰۲b
	غلظت زیستی کادمیوم (میلی گرم در بوته)			۰/۱۸ ± ۰/۰۷b
سزبانا	غلظت کادمیوم (میلی گرم بر کیلوگرم)	ریشه	کشت خالص برنج	۸۴/۰۵ ± ۱/۰۲a
		ساقه		۷۵/۶۵ ± ۸/۲۶a
		برگ		۶/۷۵ ± ۱/۷۱a
		برگ		۰/۱۳ ± ۰/۰۲a
	غلظت زیستی کادمیوم (میلی گرم در بوته)			۰/۱۹ ± ۰/۰۲a
				۳۲۰/۵۹ ± ۴۷/۸۲ a
				۲۱۹/۳۶ ± ۳۰/۱۶b

(۱) گیاه Alligator flag به دلیل بیوماس بیشتر ریشه، می تواند نسبت به برنج محتوای بیشتری از کادمیوم را از طریق ریشه های خود جذب کند.

(۲) کشت مخلوط از طریق افزایش pH خاک و کاهش $\text{NH}_4\text{-N}$ و $\text{NO}_3\text{-N}$ ، یک محیط غیرفعال برای کادمیوم ایجاد کرد.

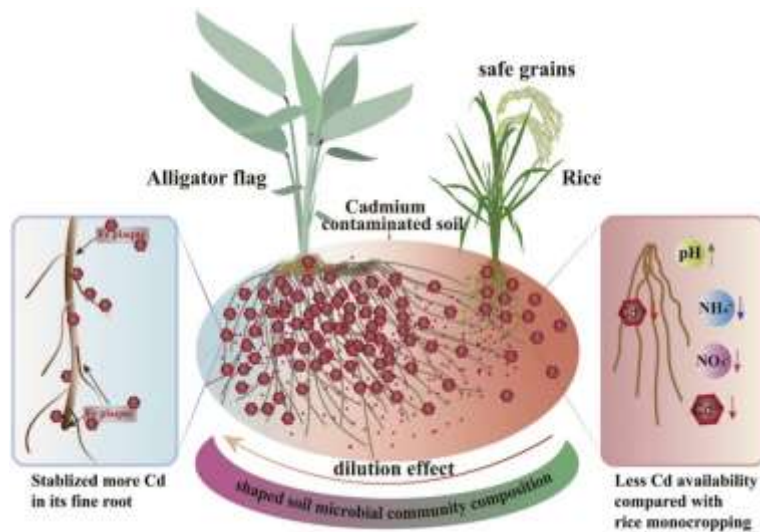
(۳) ایجاد پلاک های آهن بیشتر بر روی سطح ریشه که می تواند کادمیوم را غیرفعال و بی تحرک کند.

(۴) افزایش جمعیت و فعالیت میکروبی ریزوسفر خاک در کشت مخلوط که نقش مهمی در بی حرکتی یا غیرفعال کردن کادمیوم دارد.

همچنین سیستم کشت مخلوط به طور قابل توجهی سبب کاهش تجمع و انتقال کادمیوم از خاک به دانه های برنج شد. این مطالعه نشان داد که گیاه Alligator flag به عنوان یک تثبیت کننده گیاهی، از پتانسیل بالایی جهت تولید برنج ایمن برای مصرف انسان و گیاه پالایی خاک های آلوده به کادمیوم برخوردار است^{۲۸}.

Xu و همکاران (۲۰۲۱)^{۶۰} در کشت مخلوط یک رقم برنج کم انباشته کننده کادمیوم (Changliangyou 772) با ارقام مختلف برنج (۱۱ رقم) دریافتند که محتوای کادمیوم دانه Changliangyou 772 در کشت مخلوط نسبت به الگوی تک کشتی کاهش پیدا کرد. آن ها دلیل این امر را به کاهش pH خاک، کاهش فراهمی زیستی کادمیوم در خاک، افزایش پلاک های آهن در سطح ریشه و نهایتاً مسدود شدن جذب کادمیوم توسط ریشه، نسبت دادند. با توجه به نتایج این تحقیق، رقم Changliangyou 772 در سیستم کشت مخلوط به نحوی با ارقام مجاور در ارتباط بوده و از مکانیسم های مختلفی مانند ترشحات ریشه ای و تجمع بیشتر کادمیوم در ریشه و انتقال کمتر آن به بخش های هوایی، برای مقاومت در برابر تنش کادمیوم استفاده کرده است.

در تحقیقی دیگر کشت مخلوط برنج با گیاه Alligator flag در خاک آلوده به کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیستم کشت مخلوط میزان کادمیوم قابل دسترس در خاک را از طریق مکانیسم های زیر کاهش داد (شکل ۳):



شکل ۳: شماتیک مکانیسم‌های اصلاح کادمیوم در سیستم کشت مخلوط برنج و Alligator flag.^{۲۸}

در تاجریزی شد، بنابراین تجمع کادمیوم در این گیاه را افزایش داد. در این مطالعه، فاکتور انتقال^۲ (TF) کادمیوم برای تاجریزی در تمام تیمارها بالاتر از یک بود که ویژگی بیش انباشته‌کنندگی این گیاه را مشخص می‌کند. از طرفی، کشت مخلوط منجر به کاهش فاکتورهای انتقال و تغلیظ زیستی کادمیوم در برنج آپلند شد که نشان‌دهنده جذب و جابه‌جایی کمتر این فلز در برنج است. در مجموع، کشت مخلوط برنج آپلند با تاجریزی نتایج متفاوتی را نشان داد و منجر به کاهش غلظت کادمیوم در دانه برنج، بهبود کارایی گیاه‌پالایی و کاهش عملکرد برنج شد. Kama و همکاران (۲۰۲۳)^{۶۲} در کشت مخلوط برنج با تاجریزی به نتایج مشابهی دست یافتند.

در مطالعه‌ای Liu و همکاران (۲۰۲۱)^{۶۳} نشان دادند که کشت توأم برنج با آزولا از طریق کاهش پتانسیل ردوکس خاک، غلظت کادمیوم محلول را ۳۷ درصد نسبت به الگوی تک‌کشتی برنج کاهش داد. همچنین کشت توأم با آزولا سبب افزایش متیلوباکتر (*Methylobacter*) و کربن آلی محلول و در نتیجه کاهش در دسترس بودن کادمیوم برای برنج شد. با توجه به این اثرات، کشت توأم برنج با آزولا، غلظت

Liu و همکاران (۲۰۱۶)^{۶۱} در بررسی آلودگی کادمیوم در خاک و گیاهان ذرت، سیب‌زمینی شیرین، کلم چینی، زنجبیل، خردل هندی و برنج تحت تأثیر سیستم‌های کشت مخلوط و تناوب گزارش دادند که در سیستم مخلوط فاکتور تجمع زیستی^۱ (BAF) کادمیوم در ساقه‌ها و برگ‌های برنج به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۵۱ و برای ذرت به ترتیب برابر با ۰/۵۲ و ۱/۱ بود که بسیار بیشتر از مقادیر این فاکتور در دانه این گیاهان می‌باشد. براساس نتایج این تحقیق، ذرت و برنج به دلیل تجمع پایین کادمیوم در اندام‌های خوراکی و تجمع بالای این فلز در اندام‌های غیرخوراکی می‌توانند در سیستم مخلوط به‌عنوان محصولات مناسب برای حذف کادمیوم از زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند.

Yang و همکاران (۲۰۲۱)^{۴۵} در تحقیقی بر روی کشت مخلوط برنج آپلند با تاجریزی (*Solanum nigrum*) در خاک آلوده به کادمیوم به این نتیجه رسیدند که غلظت کادمیوم در اندام‌های مختلف برنج به‌طور قابل توجهی نسبت به الگوی تک‌کشتی کاهش پیدا کرد. آن‌ها علت این کاهش را به ترشح کمتر اسیدهای آلی و pH ریزوسفر بالاتر در برنج نسبت دادند. در مقابل، سیستم مخلوط باعث افزایش زیست‌توده، طول ریشه، سطح ریشه و کاهش pH ریزوسفر

^۱- Bio accumulation factor

^۲- Transfer factor

کادمیوم در دانه برنج را ۸۰/۳ درصد کاهش داد و باعث افزایش عملکرد محصول به میزان ۱۳/۴ درصد شد. در آزمایشی گزارش شد که کشت مخلوط رقم برنج کم انباشته کننده (Zhuliangyou 189 (Z189 با رقم برنج بیش انباشته کننده (Changxianggu (CXG کادمیوم، سبب کاهش محتوای کادمیوم ریشه، برگ و دانه رقم Z189 شد. با این حال، تفاوت معنی داری در محتوای کادمیوم ریشه، ساقه و برگ رقم CXG در مقایسه با الگوی تک کشتی مشاهده نشد. اگرچه کشت مخلوط منجر به کاهش محتوای کادمیوم دانه در CXG شد، اما این مقدار به طور قابل توجهی بالاتر از آستانه مجاز استاندارد ملی ایمنی غذایی بود. در مجموع، میزان حذف کادمیوم از خاک آلوده در کشت مخلوط ۱/۴۴ برابر بیشتر از الگوی تک کشتی بود. رقم CXG با جذب بیشتر کادمیوم سبب حذف کادمیوم اضافی و بهبود عملکرد دانه Z189 شد.^{۶۴}

بحث

مزارع شالیزاری آلوده به کادمیوم یک مشکل جدی زیست محیطی به شمار می آید. برنج کشت شده در این مزارع به طور بالقوه می تواند منجر به تجمع بالای کادمیوم در دانه های برنج شود و ایمنی غذا و سلامت انسان را تهدید کند. بنابراین، توسعه روش هایی برای اصلاح خاک های شالیزاری آلوده به کادمیوم امری ضروری است. در حال حاضر از سه معیار عمده جداسازی، حذف و تثبیت برای کاهش فراهمی زیستی کادمیوم در خاک استفاده می شود.^{۶۵} به این منظور، از گیاه پالایی می توان به عنوان یک روش مقرون به صرفه برای حذف یا رقیق کردن و کاهش فراهمی زیستی کادمیوم در خاک و همچنین کاهش غلظت آن در دانه های برنج استفاده کرد. با توجه به این که برنج سهم قابل توجهی در رژیم غذایی انسان دارد، برای انجام گیاه پالایی توسط این گیاه باید ملاحظات بیشتری جهت عدم ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی صورت گیرد. روش های زیادی برای افزایش کارایی گیاه پالایی و اصلاح اراضی شالیزاری آلوده به فلزات سنگین به کار گرفته

شده است. در مقایسه با سایر روش ها، کشت مخلوط به عنوان یک روش مدیریت زراعی سنتی به دلیل هزینه کم و اثرات مخرب کمتر بر محیط زیست، یعنی حفظ حاصلخیزی و ساختار خاک، به طور گسترده برای اصلاح خاک های آلوده به فلزات سنگین استفاده می شود.^{۶۶} کشت مخلوط می تواند با استفاده از اصول میدان اکولوژیک (آشیان اکولوژیکی) و تنوع زیستی، کارایی استفاده از منابع را بهبود بخشد و کیفیت گونه های زراعی را افزایش دهد. سیستم مخلوط از طریق افزایش توانایی آنتی اکسیدانی گونه های بیش انباشته کننده فلزات سنگین، باعث کاهش میزان مالون دی آلدئید و گونه های اکسیژن فعال در لیپیدهای غشای سلولی شده و در نتیجه تنش اکسیداتیو ناشی از فلزات سنگین در این گیاهان را کاهش می دهد. افزایش ترشح اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم از ریشه گونه های بیش انباشته کننده باعث افزایش تحرک فلزات سنگین و در نتیجه جذب بیشتر فلزات سنگین توسط این گونه ها در کشت مخلوط می شود. با این حال، ترشح اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم از ریشه گیاهان هدف مهار می شود و در نتیجه منجر به کاهش جذب فلزات سنگین و افزایش عملکرد و کیفیت محصول این گیاهان در سیستم مخلوط می شود.^{۶۷} همچنین، کشت مخلوط می تواند با بهبود استخراج گیاهی فلزات سنگین از خاک باعث تغییر فعالیت آنزیم های خاک و محیط ریزوسفر شده و در نتیجه منجر به کاهش بروز بیماری های گیاهی شود.^{۶۸} به طور کلی، در سیستم مخلوط کاهش جذب فلزات سنگین توسط گیاهان هدف خطر سلامتی انسان را کاهش می دهد و افزایش تجمع فلزات سنگین در گیاهان بیش انباشته کننده باعث افزایش حذف این آلاینده ها از خاک می شود. علاوه بر این، استفاده از کشت مخلوط برای پالایش خاک های آلوده به فلزات سنگین، مزایای کشاورزان را تحت تأثیر قرار نمی دهد و حتی ممکن است افزایش دهد. بنابراین، کشت مخلوط با استفاده از گیاهان بیش انباشته کننده یک استراتژی امیدوارکننده و

عملی برای بهبود اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و توسعه سیستم کشاورزی فشرده است.

گیاهان بیش انباشته کننده نقش مهمی در تحقیقات گیاه‌پالایی و کاربرد عملی برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین دارند. این گونه‌ها می‌توانند فلزات سنگین را بیش از حد جذب کرده و آن‌ها را به شاخه‌ها انتقال دهند. انتقال و تجمع فلزات سنگین در این گونه‌ها بیش از ۱۰۰ برابر گونه‌های دیگر است^{۶۹}. استفاده از سیستم کشت مخلوط برنج با گیاهان بیش انباشته کننده می‌تواند یک اقدام امیدوارکننده برای اصلاح شالیزارهای آلوده به کادمیوم، بدون کاهش عملکرد محصول و تجمع بیش‌ازحد مجاز کادمیوم در دانه‌های برنج باشد. با این حال، نتایج برخی از مطالعات نشان می‌دهد که کشت مخلوط با گونه‌های بیش انباشته کننده می‌تواند باعث کاهش رشد و عملکرد گیاهان هدف شود. گیاهان بیش انباشته‌کننده در سیستم مخلوط برای استفاده بیشتر از مواد مغذی، آب، نور و سایر منابع با محصولات زراعی هدف رقابت می‌کنند و در نتیجه منجر به کاهش زیست‌توده این محصولات می‌شوند^{۷۰، ۷۱}. در کشت مخلوط برنج با سایر گونه‌های گیاهی، مزیت رقابتی بیشتر برنج می‌تواند سبب کاهش عملکرد گونه‌های مخلوط شود. ساختار کانوپی و ارتفاع بلند بوته‌های برنج به‌عنوان مانعی برای رسیدن نور خورشید به گونه‌های مخلوط عمل کرده و تأثیر منفی بر رشد و عملکرد آن‌ها دارد. استفاده از گونه‌های زودرس در سیستم مخلوط و کاشت زودهنگام آن‌ها برای کوتاه کردن دوره هم‌زیستی با برنج می‌تواند از جمله راهکارهای مؤثر برای رفع این مشکل باشد^{۵۲}. از این‌رو، انتخاب مناسب گونه‌های گیاهی برای کشت مخلوط با برنج و ارزیابی پتانسیل آن‌ها جهت جذب و تجمع کادمیوم، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگر چه در مطالعات گذشته ثابت شده است که کشت مخلوط برنج با گیاهان آبی‌زی منجر به کاهش محتوای کادمیوم و افزایش عملکرد برنج می‌شود^{۷۲ و ۷۳}، با این حال، تعداد کمی از گیاهان آبی‌زی (به‌علت زیست‌توده کم) وجود دارند که از قابلیت گیاه‌پالایی

برخوردار باشند. گیاهان بیش‌انباشته‌کننده کادمیوم که تاکنون یافت شده‌اند، اغلب گیاهانی هستند که قادر به رشد در شرایط غرقابی نیستند. بنابراین، نیاز به کشف گیاهان آبی‌زی بیش‌انباشته کننده کادمیوم با زیست‌توده قابل‌توجه برای کشت مخلوط با برنج احساس می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که کشت مخلوط ارقام برنج کم‌انباشته کننده با ارقام برنج بیش‌انباشته کننده کادمیوم بهترین الگوی کشت برای پالایش این فلز از خاک است. به‌طوری‌که ارقام برنج بیش‌انباشته کننده از طریق برداشت بیشتر کادمیوم از خاک و در نتیجه کاهش غلظت کل آن در خاک، می‌توانند محیط بهتری را برای رشد ارقام کم‌انباشته کننده فراهم کنند و منجر به کاهش غلظت کادمیوم در این ارقام شوند. همچنین استفاده از گیاهان آبی‌زی و نیمه آبی‌زی مانند اسفناج آبی، سزبانی، Alligator flag، *Sphagneticola calendulacea* و *Pontederia cordata* در کشت مخلوط با برنج می‌تواند یک رویکرد مؤثر جهت به حداقل رساندن تجمع کادمیوم در دانه برنج و بهبود کارایی گیاه‌پالایی شالیزارهای آلوده به کادمیوم باشد. در این میان گیاه اسفناج آبی به دلیل قابلیت کشت تحت هر دو شرایط غرقابی و غیر غرقابی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کاهش غلظت کادمیوم در برنج تحت سیستم مخلوط نسبت به الگوی تک‌کشتی، به افزایش جمعیت و فعالیت میکروبی ریزوسفر خاک، افزایش محتوای پلاک آهن در سطح ریشه برنج، ترشح کمتر اسیدهای آلی و pH ریزوسفر بالاتر در برنج نسبت داده شد. بنابراین، کشت مخلوط برنج با گونه‌های بیش‌انباشته کننده کادمیوم، پتانسیل بالایی در تولید برنج ایمن جهت مصرف انسان و گیاه‌پالایی شالیزارهای آلوده به کادمیوم دارد.

References

- Hu U, Chan PT, Wu F, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi induce differential Cd and P acquisition by Alfred stonecrop (*Sedum alfredii* Hance) and upland kangkong (*Ipomoea aquatica* Forsk.) in an intercropping system. *Appl Soil Ecol* 2013;63: 29-35.
- Ghosh M, Singh S. A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species. *Environ Pollut* 2005;133: 365-371.
- Islam F, Wang J, Farooq MA, et al. Rice responses and tolerance to salt stress: Deciphering the physiological and molecular mechanisms of salinity adaptation. In: Hasanuzzaman M, Fujita M, Nahar K, Biswas JK. editor. *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*. Elsevier; 2019. p. 791-819.
- Liang J, Feng C, Zeng G, et al. Atmospheric deposition of mercury and cadmium impacts on topsoil in a typical coal mine city, Lianyuan, China. *Chemosphere* 2017;189: 198-205.
- Pereira G, Molina SMG, Lea P, Azevedo RA. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea*. *Plant Soil* 2002;239: 123-132.
- Song WE, Chen SB, Liu JF, et al. Variation of Cd concentration in various rice cultivars and derivation of cadmium toxicity thresholds for paddy soil by species-sensitivity distribution. *J Integr Agric* 2015;14: 1845-1854.
- Ashraf U, Kanu AS, Mo Z, et al. Lead toxicity in rice: effects, mechanisms, and mitigation strategies-a mini review. *Environ Sci Pollut Res* 2015;22(23): 18318-18332.
- Zhang XF, Zhang XH, Gao B, et al. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of an energy crop, king grass (*Pennisetum Americanum* × *P. purpureum*). *Biomass Bioenergy* 2014;67: 179-187.
- Yu Y, Wan Y, Camara AY, Li H. Effects of the addition and aging of humic acid-based amendments on the solubility of Cd in soil solution and its accumulation in rice. *Chemosphere* 2018;196: 303-310.
- Jarup L, Akesson A. Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicol Appl Pharm* 2009;238: 201-208.
- Ma L, Wu Y, Wang Q, Feng Y. The endophytic bacterium relieved healthy risk of pakchoi intercropped with hyperaccumulator in the cadmium polluted greenhouse vegetable field. *Environ Pollut* 2020;264: 114796.
- Pandey VC, Bajpai O, Singh N. Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54: 58-73.
- Vamerali T, Bandiera M, Mosca G. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environ Chem Lett* 2010;8(1): 1-17.
- Murakami M, Nakagawa F, Ae N, et al. Phytoextraction by rice capable of accumulating Cd at high levels: Reduction of Cd content of rice grain. *Environ Sci Technol* 2009;43: 5878-5883.
- Sarwar N, Imran M, Shaheen MR, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere* 2017;171: 710-721.
- Lin H, Wang Z, Liu C, Dong Y. Technologies for removing heavy metal from contaminated soils on farmland: A review. *Chemosphere* 2022;305: 135457.
- Tang L, Hamid Y, Zehra A, et al. Fava bean intercropping with *Sedum alfredii* inoculated with endophytes enhances phytoremediation of cadmium and lead co-contaminated field. *Environ Pollut* 2020; 265: 114861.
- Tang Y, He J, Yu X, et al. Intercropping with *Solanum nigrum* and *Solanum photeinocarpum* from Two Ecoclimatic Regions Promotes Growth and Reduces Cadmium Uptake of Eggplant Seedlings. *Pedosphere* 2017;27(3): 638-644.
- Huang B, Xin J, Dai H, Zhou W. Effects of interaction between cadmium (Cd) and selenium (Se) on grain yield and Cd and Se accumulation in a hybrid rice (*Oryza sativa*) system. *J Agric Food Chem* 2017;65: 9537-9546.
- Wu JS, Ge TD, Hu YJ. A review on the coupling of biogeochemical process for key elements and microbial regulation mechanisms in paddy rice ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* 2015;35: 6626-6634.
- Wang FJ, Wang M, Liu ZP, et al. Different responses of low grain-Cd-accumulating and high grain-Cd accumulating rice cultivars to Cd stress. *Plant Physiol Biochem* 2015;96: 261-269.
- Hu Y, Cheng H, Tao S. The Challenges and Solutions for Cadmium-contaminated Rice in China: A Critical Review. *Environ Int* 2016;92-93: 515-532.
- Kashem M, Singh B. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn. *Nutri Cycl Agroecosys* 2001;61(3): 247-255.
- Li W, Xu B, Song Q, et al. The identification of hotspots of heavy metal pollution in soil-rice systems at a regional scale in eastern China. *Sci Total Environ* 2014;472: 407-420.
- Rashid I, Murtaza G, Zahir ZA, Farooq M. Effect of humic and fulvic acid transformation on cadmium availability to wheat cultivars in sewage sludge amended soil. *Environ Sci Pollut Res* 2018;25: 16071-16079.
- Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, et al. Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains. *Environ Sci Technol* 2016;50(8): 4178-4185.
- Chen XW, Wu L, Luo N, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and the associated bacterial community influence the uptake of cadmium in rice. *Geoderma* 2019;337: 749-757.
- Wang J, Lu X, Zhang J, et al. Rice intercropping with alligator flag (*Thalia dealbata*): A novel model to produce safe cereal grains while remediating cadmium contaminated paddy soil. *J Hazard Mater* 2020;394: 122505.
- Li Z, Li L, Chen GPJ. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: soil type versus genotype effects. *Plant Soil* 2005;271: 165-173.
- Wang MY, Chen AK, Wong MH, et al. Cadmium accumulation in and tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) varieties with different rates of radial oxygen loss. *Environ Pollut* 2011;159: 1730-1736.

31. Armstrong W. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants. *Nature* 1964;204: 801-802.
32. Liu J, Cao C, Wong M, et al. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake. *J Environ Sci China* 2010;22: 1067-1072.
33. An L, Pan Y, Wang Z, Zhu, C. Heavy metal absorption status of five plant species in monoculture and intercropping. *Plant Soil* 2011;345: 237-245.
34. Liu Y, Zhuang P, Li ZA, et al. Cadmium accumulation in maize monoculture and intercropping with six legume species. *Acta Agric Scand, Sect B- Soil Plant Sci* 2013;63(4): 376-382.
35. Jones DL, Dennis PG, Owen AG, et al. Organic acid behavior in soil-misconceptions and knowledge gaps. *Plant Soil* 2003;248: 31-41.
36. Khan AG, Keuk C, Chaudhry TM, et al. Role of plants, mycorrhizae and phytohelators in heavy metal contaminated land remediation. *Chemosphere* 2000;41: 197-207.
37. Wang J, Liu C, Zhang X, et al. Effects of applying hyperaccumulator straw in soil on growth and cadmium accumulation of *Galinsoga parviflora*. *Environ Prog Sustain* 2016;35: 618-623.
38. Yang B, Shu WS, Ye ZH, et al. Growth and metal accumulation in vetiver and two *Sesbania* species on lead/zinc mine tailings. *Chemosphere* 2003;52: 1593-1600.
39. Whiting SN, Leake JR, McGrath SP, et al. Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi caerulescens* can ameliorate Zn toxicity in the rhizosphere of cocropped *Thlaspi arvense*. *Environ Sci Technol* 2001;35: 3237-3241.
40. Li NY, Li ZA, Zhuang P, et al. Cadmium uptake from soil by maize with intercrops. *Water Air Soil Pollut* 2009;199: 45-56.
41. Liu L, Li Y, Tang J, et al. Plant coexistence can enhance phytoextraction of cadmium by tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) in contaminated soil. *J Environ Sci* 2011;23: 453-460.
42. Azeez JO, Hassan OA, Adesodun JK, Arowolo TA. Soil metal sorption characteristics and its influence on the comparative effectiveness of EDTA and legume intercrop on the phytoremediative abilities of Maize (*Zea mays*), Mucuna (*Mucuna pruriens*), Okra (*Abelmoschus esculentus*), and Kenaf (*Hibiscus cannabinus*). *Soil Sediment Contam. Int J* 2013;22: 930-957.
43. Xia H, Liang D, Chen F, et al. Effects of mutual intercropping on cadmium accumulation by the accumulator plants *Conyza canadensis*, *Cardamine hirsuta*, and *Cerastium glomeratum*. *Int J Phytoremediation* 2018;20: 855-861.
44. Luo J, He W, Rinklebe J, et al. Distribution characteristics of Cd in different types of leaves of *Festuca arundinacea* intercropped with *Cicer arietinum* L.: a new strategy to remove pollutants by harvesting senescent and dead leaves. *Environ Res* 2019;179: 108801.
45. Yang X, Qin JH, Li JC, et al. Upland rice intercropping with *Solanum nigrum* inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi reduces grain Cd while promoting phytoremediation of Cd-contaminated soil. *J Hazard Mater* 2021;406: 124325.
46. Mubeen S, Ni W, He C, Yang Z. Agricultural Strategies to Reduce Cadmium Accumulation in Crops for Food Safety. *Agriculture* 2003;13(2): 471.
47. Li L, Zou D, Zeng X, et al. Enhancing cadmium extraction potential of *Brassica napus*: effects of rhizosphere interactions. *J Environ Manag* 2021;284: 112056.
48. Qin L, Li Z, Li B, et al. Organic acid excretion in root exudates as a mechanism of cadmium uptake in a *Sonchus asper-Zea mays* intercropping system. *Bull Environ Contam Toxicol* 2021;107: 1059-1064.
49. Yi T, Juan H, Xuen Y, et al. Intercropping with *Solanum nigrum* and *Solanum photeinocarpum* from two ecoclimatic regions promotes growth and reduces cadmium uptake of eggplant seedlings. *Pedosphere* 2017;27: 638-644.
50. Zou J, Song F, Lu Y, et al. Phytoremediation potential of wheat intercropped with different densities of *Sedum plumbizincicola* in soil contaminated with cadmium and zinc. *Chemosphere* 2021;276: 130223.
51. Hussein Y, Amin G, Askora A, Gahin H. Phytotoxicity remediation in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivated in Cadmium- contaminated soil by intercropping design. *Bioscience Research* 2019;16(3): 2678-2689.
52. Kang Z, Zhang W, Qin J, et al. Yield advantage and cadmium decreasing of rice in intercropping with water spinach under moisture management. *Ecotoxicol Environ Saf* 2020;190: 110102.
53. Yang X, Zhang W, Qin J, et al. Role of passivators for Cd alleviation in rice-water spinach intercropping system. *Ecotoxicol Environ Saf* 2020;205: 111321.
54. Chen X, Zhang Ze, Song X, et al. Interspecific root interaction enhances cadmium accumulation in *Oryza sativa* when intercropping with cadmium accumulator *Artemisia argyi*. *Ecotoxicol Environ Saf* 2024;269: 115788.
55. Wu HJ, Li L, Zhang FX. The Influence of Interspecific Interactions on Cd Uptake by Rice and Wheat Intercropping. *Rev China Agric Sci Technol* 2003;5: 43-47.
56. Xue T, Liao X, Li H, et al. Remediation of Cd contaminated paddy fields by intercropping of the high- and low-Cd-accumulating rice cultivars. *Sci Total Environ* 2023;878: 163133.
57. Xiang H, Lan N, Wang F, et al. An effective planting model to decrease cadmium accumulation in rice grains and plants: Intercropping rice with wetland plants. *Pedosphere* 2023;33(2): 355-364.
58. Lei LL, Zhu QY, Xu PX, Jing YX. The intercropping and arbuscular mycorrhizal fungus decrease Cd accumulation in upland rice and improve phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Sphagneticola calendulacea* (L.) Pruski. *J Environ Manage* 2021;298: 113516.
59. Kang Z, Gong M, Li Y, et al. Low Cd-accumulating rice intercropping with *Sesbania cannabina* L. reduces grain Cd while promoting phytoremediation of Cd-contaminated soil. *Sci Total Environ* 2021;800: 149600.
60. Xu Y, Feng J, Li H. How intercropping and mixed systems reduce cadmium concentration in rice grains and improve grain yields. *J Hazard Mater* 2021;402: 123762.

61. Liu Y, Liu K, Li Y, et al. Cadmium contamination of soil and crops is affected by intercropping and rotation systems in the lower reaches of the Minjiang River in south-western China. *Environ Geochem Health* 2016;38(3): 811-20.
62. Kama R, Ma Q, Nabi F, et al. Hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. Intercropping reduced rice Cadmium uptake under a high-bed and low-ditch planting system. *Plants* 2023;12(23): 4027.
63. Liu C, Guo B, Li H, et al. Azolla incorporation under flooding reduces grain cadmium accumulation by decreasing soil redox potential. *Sci Rep* 2021;11: 6325.
64. Xu Y, Feng J, Li H. Water management increased rhizosphere redox potential and decreased Cd uptake in a low-Cd rice cultivar but decreased redox potential and increased Cd uptake in a high-Cd rice cultivar under intercropping. *Sci Total Environ* 2021;751: 141701.
65. Ji P, Sun T, Song Y, , et al. Strategies for enhancing the phytoremediation of cadmium-contaminated agricultural soils by *Solanum nigrum* L. *Environ Pollut* 2011;159: 762-768.
66. Ma J, Lei E, Lei M, et al. Remediation of Arsenic contaminated soil using malposed intercropping of *Pteris vittata* L. and maize. *Chemosphere* 2018;194: 737-744.
67. GUO SY, WANG HJ, WANG HB. Advances in the intercropping remediation of heavy metal polluted soil. *Chin J Eco-Agric* 2021;29(5): 890-902.
68. Yang R, Tang J, Chen X, et al. Effects of coexisting plant species on soil microbes and soil enzymes in metal lead contaminated soils. *Appl Soil Ecol* 2007;37: 240-246.
69. Baker AJM, Whiting SN. In search of the Holy Grail – a further step in understanding metal hyperaccumulation? *New Phytol* 2002;155: 1-4.
70. Glaze-Corcoran S, Hashemi M, Sadeghpour A, et al. Understanding intercropping to improve agricultural resiliency and environmental sustainability. *Adv Agron* 2020;162: 199-256.
71. Connolly J, Gomab HC, Rahimc K. The information content of indicators in intercropping research. *Agr Ecosyst Environ* 2001;87(2): 191-207.
72. Zou M, Zhou S, Zhou Y, et al. Cadmium pollution of soil-rice ecosystems in rice cultivation dominated regions in China: A review. *Environ Pollut* 2021;280: 116965.
73. Lin Q, Tong W, Hussain B, et al. Cataloging of Cd allocation in late rice cultivars grown in polluted gleysol: implications for selection of cultivars with minimal risk to human health. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17: 3632.

Effect of intercropping on the Cd accumulation in soil and rice plants: A review

Sajjad Shaker-Kouhi^{1*}, Mohammad Rabiee²

1. Expert, Department of Agronomy and Plant Breeding, Rice Research Institute, Rasht, Iran

2. Researcher, Department of Agronomy and Plant Breeding, Rice Research Institute, Rasht, Iran

Email: Sajjadshaker53@gmail.com

Received: 2 May 2024, Accepted: 11 June 2024

ABSTRACT

Background: A high cadmium (Cd) concentration in the paddy soil and translocation to the rice grain and the food chain is a serious environmental problem. Hence, it is essential to develop strategies for reducing Cd accumulation in rice and maintaining food safety. Phytoremediation is a cost-effective technique used to extract or remove Cd from contaminated sites. Intercropping is regarded as an effective technique for enhancing the Cd phytoremediation efficiency. According to this, the purpose of this study was to evaluate the effect of intercropping on the Cd accumulation in soil and rice plants.

Methods: Data for the present study was collected through searching articles in databases, including Google Scholar, Springer, ScienceDirect, ProQuest, PubMed, ResearchGate, Scopus and Elsevier. In the initial search, a total of 62 articles were found in the period 2003 to 2022, and was reduced after removing duplicates to 45 articles. Then, in the screening stage, the title and abstract of the articles were reviewed and at the end, 29 articles remained. The full text of the screened articles was studied and finally, 19 articles were used in this study.

Results: The results showed that intercropping of the high-Cd and the low-Cd rice cultivars is an advantageous practice for Cd remediation in paddy soils. So that intercropping with the high-Cd rice cultivar decreased grain Cd content, and improved the yield of the low-Cd rice cultivar. Also, intercropping of rice with Water spinach, Sesbania cannabina, Alligator flag, Sphagneticola calendulacea, Canna indica and Pontederia cordata, can function as an effective way for Cd remediation and guarantee rice grain safety.

Conclusion: Intercropping with hyperaccumulator plants is ideal to achieve safe rice production and phytoremediation of Cd-contaminated soil.

Keywords: Cadmium, Hyperaccumulator, Intercropping, Phytoremediation, Rice