JEHE Alborz University of Medical Sciences Journal of Environmental Health Engineering , 2025; 13(1):91-107 Systematic Review Article

Strategies for reducing arsenic accumulation in rice grains: A systematic review

Received: 22 February 2025, Accepted: 22 March 2025

Sajjad Shaker Kouhi[1*], Mohammad Rabiee[1]

[1] *Department of Agronomy and Plant Breeding, Rice Research Institute, Rasht, Iran*

***Corresponding Author:**
s.shaker@areeo.ac.ir

How to Cite This Article:
Shaker Kouhi S, Rabiee M. Strategies for reducing arsenic accumulation in rice grains: A systematic review. Journal of Environmental Health Engineering. 2025;13(1):91-107.

DOI:

ABSTRACT

Background: Arsenic (As) is one of the most toxic heavy metals posing a serious threat to human health by affecting the food chain. Compared to other cereals, rice has a high potential for As accumulation due to growth in flooded conditions. Therefore, it is essential to develop strategies for reducing As accumulation in rice grain. Accordingly, the present study was conducted with the aim of investigating the strategies for reducing As accumulation in rice grain.

Materials and Methods: In the initial search of articles, a total of 164 articles published between 2004 and 2024, and were reduced after removing duplicates to 126 articles. Then, in the screening stage, the title and abstract of the articles were reviewed and at the end, 92 articles remained. The full text of the screened articles was studied and finally, 68 articles were used in this study.

Results: The results showed that water management practices such as intermittent irrigation can help reduce As content of rice plants due to changing the redox status of the soil. In addition, As uptake and toxicity in rice can be reduced by the application of organic amendments (biochar and organic fertilizers) and inorganic amendments (iron, silicon and sulfur). Another way to reduce arsenic absorption by rice is the use of nanotechnology. Selection of low As accumulating rice cultivars and inoculation with microorganisms are among the other agronomic practices successfully employed for reducing As concentration in rice grains.

Conclusion: The use of appropriate management practices can enhance rice tolerance to As stress and reduce entry into the food chain.

Keywords: Arsenic, Biochar, Heavy metals, Rice, Water management

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

Copyright © 2025 The Authors.
Published by Alborz University of Medical Sciences
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License. (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).Non-commercial uses of the work are permitted,provided the original work is properly cited.

JEHE
مجله مهندسی بهداشت محیط، دوره ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، صفحات ۹۱ تا ۱۰۷
Alborz University of Medical Sciences
مقاله مرور ساختار یافته

استراتژی‌های کاهش انباشت آرسنیک در دانه برنج: یک مطالعه مروری نظام‌مند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹

سجاد شاکرکوهی[1*]، محمد ربیعی[1]

[1] بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران

چکیده

زمینه و هدف: آرسنیک یکی از سمی‌ترین فلزات سنگین است که با تأثیر بر زنجیره غذایی، می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامت انسان باشد. برنج به‌دلیل رشد در شرایط غرقابی، در مقایسه با سایر غلات از ظرفیت قابل‌توجهی برای تجمع آرسنیک برخوردار است. بنابراین، توسعه روش‌هایی برای کاهش تجمع آرسنیک در دانه برنج امری ضروری است. بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف بررسی راهکارهای کاهش تجمع آرسنیک در خاک و گیاه برنج انجام شد.

مواد و روش ها: در جستجوی اولیه مقالات، در مجموع ۱۶۴ مقاله در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ یافت شد و پس از حذف موارد تکراری، این تعداد به ۱۲۶ رسید. سپس در مرحله غربالگری، عنوان و چکیده مقالات مورد بررسی قرار گرفت و در انتهای این مرحله تعداد ۹۲ مقاله باقی ماند. در نهایت پس از بررسی متن کامل مقالات، تعداد ۶۸ مقاله برای این مطالعه استفاده شد.

یافته ها: نتایج نشان داد که شیوه‌های مدیریت آب از جمله آبیاری تناوبی به‌دلیل تغییر وضعیت ردوکس خاک می‌تواند به کاهش محتوای آرسنیک در برنج کمک نماید. علاوه بر این، سمیت و جذب آرسنیک در برنج را می‌توان با استفاده از اصلاح‌کننده‌های ارگانیک (بیوچار و کودهای آلی) و اصلاح‌کننده‌های غیرارگانیک (آهن، سیلیکون و گوگرد) کاهش داد. استفاده از فناوری نانو، روش دیگری برای کاهش جذب آرسنیک توسط برنج است. انتخاب ارقام برنج کم انباشته کننده آرسنیک و کاربرد میکروارگانیسم‌ها از دیگر اقدامات زراعی موفق برای کاهش غلظت آرسنیک در دانه برنج هستند.

نتیجه گیری: استفاده از شیوه‌های مدیریتی مناسب می‌تواند تحمل گیاه برنج به تنش آرسنیک را افزایش داده و انتقال آن به زنجیره غذایی را کاهش دهد.

واژه های کلیدی: آرسنیک، برنج، بیوچار، فلزات سنگین، مدیریت آب

***پست الکترونیکی نویسنده مسئول:**
s.shaker@areeo.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:
Shaker Kouhi S, Rabiee M. Strategies for reducing arsenic accumulation in rice grains: A systematic review. Journal of Environmental Health Engineering. 2025;13(1):91-107.

DOI:

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

مقدمه

آرسنیک (As) به‌عنوان یک شبه‌فلز بسیار سمی محسوب می‌شود که از نظر فراوانی بیستمین عنصر موجود در پوسته زمین به‌شمار می‌رود. اگرچه آرسنیک به‌طور طبیعی در خاک وجود دارد، اما غلظت زیاد آن در منابع آب و خاک، یک تهدید جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان است[۱]. آلودگی محیطی ناشی از آرسنیک از فرایندهای طبیعی مانند هوازدگی مواد مادری، فوران‌های آتش‌فشانی و فعالیت‌های انسانی از جمله کشاورزی، معدن کاری، ذوب فلزات و خاکستر سوخت‌های فسیلی سرچشمه می‌گیرد[۲،۳]. آرسنیک به‌دلیل ماندگاری بالا در خاک یکی از خطرناک‌ترین عناصر سنگین است. این عنصر غیرمحلول در آب و غیرضروری برای گیاهان می‌باشد[۴]. حد مجاز آرسنیک در خاک و گیاه به‌ترتیب ۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک است. همچنین، حد سمی آن برای گیاه ۲ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک می‌باشد[۵]. سمیت آرسنیک منجر به اثرات نامطلوب بر فرآیندهای متابولیکی، رشد و نمو و در نتیجه کاهش عملکرد گیاهان می‌شود[۶]. آرسنیک با کاهش برخی از آنزیم‌های حیاتی مانند گلوتامین سینتتاز و نیترات ردوکتاز، موجب تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود که سبب بروز خسارت‌هایی زیادی از جمله پراکسیداسیون لیپیدها، اکسید شدن پروتئین‌ها، تخریب کلروپلاست‌ها و کاهش رنگریزه‌های فتوسنتزی در گیاهان می‌گردد[۷،۸].

مصرف آب آشامیدنی و مواد غذایی با سطوح بالای آرسنیک از راه‌های اصلی ورود آرسنیک به بدن انسان است[۱]. سطوح بالای آرسنیک می‌تواند منجر به طیف وسیعی از مشکلات حاد و مزمن برای سلامتی انسان از جمله سرطان پوست، ریه و کبد، ضعف عضلانی، دیابت، افزایش فشارخون، اختلالات دستگاه گوارش و بیماری‌های قلبی عروقی شود[۹،۱۰]. برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی در جهان است که به‌عنوان رژیم غذایی اصلی بیش از نیمی از جمعیت کره‌زمین، نقش کلیدی در امنیت غذایی ایفا می‌کند[۱۱]. با توجه به اینکه آب‌های سطحی و زیرزمینی آلوده به آرسنیک ممکن است در آبیاری بسیاری از محصولات کشاورزی از جمله برنج استفاده شوند، بنابراین خطر انتقال آرسنیک از آب و خاک آلوده به گیاه برنج و در نتیجه به زنجیره غذایی وجود دارد[۱۲]. علاوه بر آب آبیاری، استفاده آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی و آلی آلوده به آرسنیک از مهم‌ترین منابع ورودی این فلزسنگین به اکوسیستم شالیزار به‌شمار می‌روند[۱۳،۱۴]. خاک‌های شالیزاری به‌علت 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[۱۵]. آرسنیت (AsIII) و آرسنات (AsV) گونه‌های غالب معدنی آرسنیک در شالیزار به‌شمار می‌روند که به‌ترتیب ۶۳ و ۳۶ درصد از کل آرسنیک موجود در خاک را تشکیل می‌دهند. حلالیت و تحرک آرسنیت در محلول خاک بیشتر از آرسنات است و در نتیجه به‌راحتی توسط گیاه برنج جذب می‌شود[۱۶].

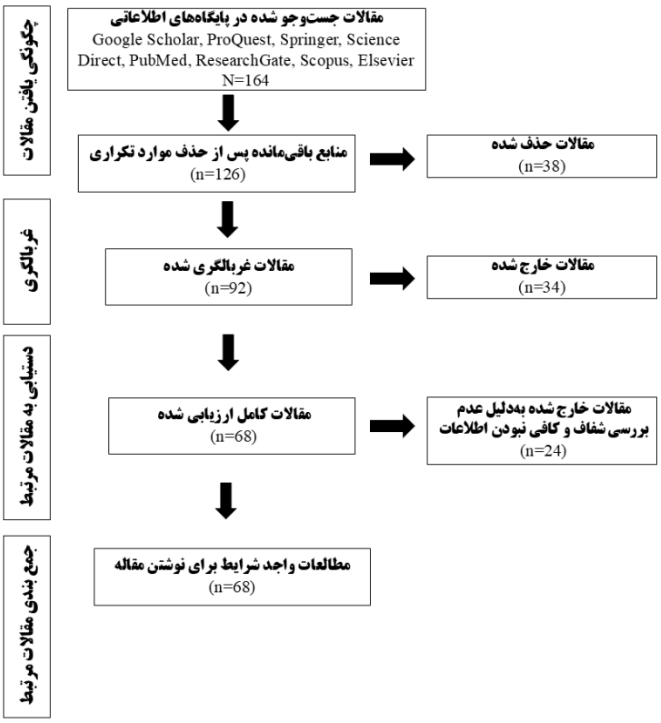
برنج به‌دلیل رشد در شرایط بی‌هوازی (غرقابی)، نسبت به سایر غلات تمایل بیشتری به تجمع آرسنیک دارد. برنج در جذب برخی از انواع آرسنیک کارآمدتر است، این موضوع به‌ویژه در مورد آرسنیت که تحرک زیادی دارد، صدق می‌نماید[۱۷]. حداکثر غلظت مجاز آرسنیک برای برنج سفید ۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم و برای شلتوک برنج ۰/۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم توصیه شده است[۵]. نکروزه شدن برگ‌های مسن و کلروزه شدن برگ‌های جوان، از جمله علائم سمیت آرسنیک در گیاه برنج به‌شمار می‌روند[۹]. مقدار جذب و تجمع آرسنیک در گیاه به منبع و حلالیت آرسنیک بستگی دارد[۱۸]. همچنین بافت خاک، وضعیت حاصلخیزی خاک، pH، درصد ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، پتانسیل ردوکس (Eh)، مدیریت آب و کاربرد کودهای شیمیایی از جمله فسفر و پتاسیم بر تحرک و قابلیت دسترسی آرسنیک برای گیاهان تأثیر دارند[۱۹]. به‌دلیل نقش ویژه برنج در تغذیه انسان، موضوع آلودگی اراضی شالیزاری به آرسنیک و ارائه راهکارهای مناسب برای رفع این مشکل بدون کاهش

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

عملکرد برنج، نیاز به توجه ویژه‌ای دارد. این بررسی به‌طور سیستماتیک عوامل مؤثر بر انتقال آرسنیک از خاک به گیاه برنج را مورد بحث قرار می‌دهد و رویکردهای مدیریتی و تکنیک‌های مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست را جهت کاهش جذب و تجمع آرسنیک در دانه برنج ارائه می‌کند.

روش کار

مطالعه حاضر یک مطالعه مروری نظامند با رویکرد زیست‌محیطی و سلامت انسان است که در بهمن‌ماه ۱۴۰۳ انجام شد. پایگاه‌های اطاعاتی مورد استفاده شامل Google Scholar، ProQuest، Springer، ScienceDirect، PubMed، ResearchGate، Scopus و Elsevier بود. به‌منظور دستیابی به نتایج بهتر، کلیدواژه‌های ترکیبی Arsenic، Heavy metals، Rice، Soil contamination، Safe rice، production، Accumulation و Paddy field در پایگاه‌های مذکور جست‌وجو شدند. معیار ورود مقالات به مطالعه، مطالب مرتبط با آلودگی آرسنیک در شالیزار و دانه برنج و ارائه راهکارها و رویکردهای مدیریتی مناسب برای کاهش آن بود. همچنین، معیارهاری خروج مطالعه نیز عدم ارائه اطلاعات کافی، دسترسی نداشتن به متن کامل مقالات و تکراری بودن مطالعات بود. پس از جست‌وجو برای کلیدواژه‌ها، درمجموع تعداد ۱۶۴ مقاله در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ یافت شد که تعداد ۳۸ مقاله به‌دلیل 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 ۹۲ مقاله باقی ماند. در نهایت پس از بررسی متن کامل مقالات، تعداد ۶۸ مقاله ثبت و در مطالعه حاضر استفاده شد (شکل ۱).



شکل ۱. فلوچارت جست‌وجوی پریسما

یافته‌های پژوهش

روش‌های کاهش انباشت آرسنیک در خاک و گیاه برنج

مدیریت آب

مدیریت آب یکی از مؤثرترین رویکردها برای کنترل فراهمی‌زیستی آرسنیک در اکوسیستم شالیزار است[۲۰]. تحت شرایط غرقابی در شالیزار، به‌دلیل انحلال احیاء کننده اکسی هیدروکسید آهن، احیای آرسنات جذب شده به آرسنیت و جایگزین شدن فسفات و مواد آلی محلول خاک

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

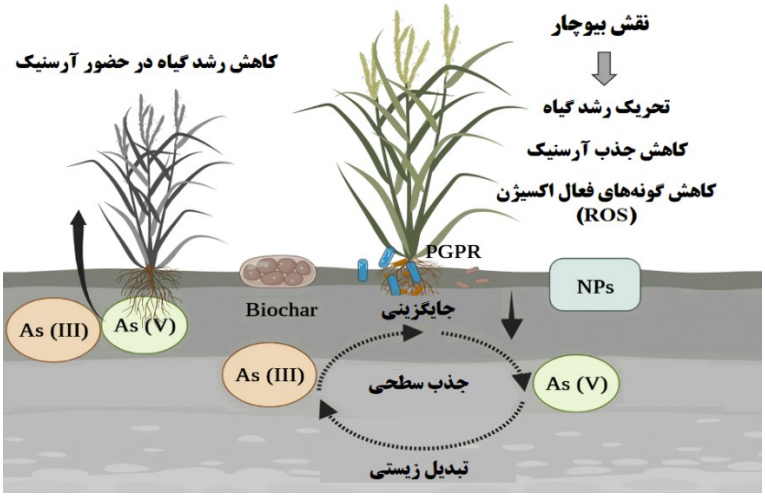
با آرسنات یا آرسنیت، تحرک آرسنیک افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش قابلت دسترسی آن برای گیاه برنج می‌شود. در مقابل تحت شرایط هوازی، میزان آرسنیک موجود در محلول خاک ناچیز است[۲۱، ۲۲]. خاک غرقابی باعث کاهش مواد آلی و تجمع متابولیت‌های سمی مانند سولفیدها می‌شود که در نتیجه آن فعالیت میکروارگانیسم‌های مسئول واکنش‌های متیلاسیون آرسنیک محدود می‌شود[۲۳، ۲۴]. نتایج مطالعه‌ای نشان داد که در دو نمونه خاک شالیزاری قبل از غرقاب شدن، آرسنات گونه قالب آرسنیک در فاز جامد خاک بوده و سهم آرسنیت در حدود ۱۵ درصد بود. پس از غرقاب شدن خاک و کاهش هم‌زمان پتانسیل اکسداسیون احیاء، سهم آرسنیت از کل آرسنیک خاک به ۶۰ تا ۸۰ درصد افزایش یافت[۲۲].

استفاده از روش آبیاری تناوبی (چرخه‌های متناوب خشک و مرطوب) می‌تواند موجب کاهش میزان آرسنیک در محلول خاک و در نتیجه کاهش انتقال آن به دانه برنج شود، که دلیل این امر به کاهش تحرک آرسنیک در فاز خشک (شرایط هوازی) نسبت داده شده است[۳ و ۲۵]. از طرف دیگر به‌دلیل کاهش مصرف آب در این روش، میزان آرسنیک ورودی به مزرعه در اثر مصرف آب‌های زیرزمینی آلوده به آرسنیک کاهش می‌یابد[۲۶]. محققان گزارش کردند که همبستگی معنی‌داری بین شیوه‌های آبیاری و غلظت آرسنیک در برنج وجود دارد. نتایج آن‌ها نشان داد که اعمال چرخه‌های متناوب خشک و مرطوب موجب کاهش محتوای آرسنیک در اندام هوایی و دانه برنج به‌ترتیب به‌میزان ۲۷ و ۱۵ درصد نسبت به شرایط غرقابی دائم شد[۲۷]. نتایج آزمایشی نشان داد که میزان آرسنیک موجود در دانه‌های برنج تحت تیمار غرقابی متناوب ۴۱ درصد کمتر از تیمار غرقابی دائم بود[۲۸].

استفاده از اصلاح‌کننده‌های ارگانیک

۱) بیوچار:

بیوچار محصول جانبی تجزیه حرارتی مواد آلی تحت شرایط محدود اکسیژن در یک محیط کنترل شده است که به‌عنوان یک جاذب مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست از پتانسیل بالایی برای کنترل فراهمی‌زیستی و کاهش سمیت فلزات سنگین مانند آرسنیک برخوردار است[۲۹]. نقش بیوچار در کاهش سمیت آرسنیک در گیاه در شکل ۲ نشان داده شده است. بیوچار دارای ساختاری متخلخل با سطح ویژه بالا و گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن فراوان است. حضور این گروه‌های عاملی در بیوچار، تشکیل کمپلکس‌های سطحی قوی و تبادل یونی با فلزات سنگین را ممکن می‌سازد که که برای تثبیت و افزایش غلظت غیرقابل جذب فلزات در خاک بسیار مهم هستند[۳۰، ۳۱]. از این‌رو، استفاده از بیوچار برای اصلاح مکان‌های آلوده به فلزات گسترش یافته است[۳۲]. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که کاربرد بیوچار سبب کاهش غلظت آرسنیک در گیاه برنج می‌شود (جدول ۱).



شکل ۲. نقش بیوچار در کاهش سمیت آرسنیک[۳]

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

جدول ۱. اثر بیوچار بر غلظت آرسنیک در گیاه برنج

نوع بیوچار	دوزهای اعمال شده	سطوح آرسنیک	میزان کاهش آرسنیک	منابع
بیوچار پوسته برنج + نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی	۱/۵ تن در هکتار	۲۲/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم	کاهش ۳۳-۱۶ درصد در دانه	(۳۳)
بیوچار پوسته برنج	۱۲/۵ تن در هکتار	۸۳ کیلوگرم در هکتار	کاهش ۲۴-۲۰ درصد در دانه	(۳۴)
بیوچار اصلاح شده با اکسیدهای Fe-Mn-Ce	۵۰ گرم در ۲/۵ کیلوگرم در خاک	۱۳۸ کیلوگرم در هکتار	کاهش ۷۳/۵۸ درصد در دانه	(۳۵)
بیوچار + کود سیلیکات	۰/۵ درصد	۳۶ ± ۱۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم	کاهش ۱۶-۱۴ درصد در دانه	(۳۶)
بیوچار پوسته گندم	۲۰ تن در هکتار	۱۰/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم	کاهش ۴۸/۱-۲۷/۶ درصد در اندام هوایی و ۴۰/۱-۳۷/۴ درصد در دانه	(۳۷)
بیوچار پوسته برنج + نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی	۱ درصد	۴۴ ± ۲۴۹ میلی‌گرم در کیلوگرم	کاهش ۴۲ درصد در دانه	(۳۸)

میزان کاربرد بیوچار جهت کاهش غلظت و سمیت آرسنیک متفاوت است و به نوع خاک، ارقام برنج، نوع بیوچار و سطوح آرسنیک در خاک بستگی دارد[۳۹]. به‌منظور بهبود کارایی بیوچار در کاهش غلظت آرسنیک، استفاده از اکسید آهن، اکسید منیزیم، گرافن اکسید و کربنات کلسیم پیشنهاد شده است[۴۰، ۴۱، ۴۲]. محققان دلیل کاهش محتوای آرسنیک در دانه برنج با کاربرد بیوچار پوسته برنج را به افزایش سیلیسیم قابل دسترس در محلول خاک و در نتیجه افزایش جذب آن توسط گیاه برنج نسبت دادند. سیلیسیم، جذب آرسنیک توسط ریشه برنج را محدود می‌کند[۴۳]. کاهش محتوای آرسنیک در دانه برنج با کاربرد بیوچار پوسته برنج اصلاح شده با آهن صفر ظرفیتی، به افزایش pH خاک و کاهش آرسنیک قابل دسترس در محلول خاک نسبت داده شده است[۳۳]. همچنین گزارش شد که استفاده طولانی مدت از بیوچار می‌تواند به‌طور قابل توجهی باعث افزایش اکسید آهن در ریزوسفر ریشه برنج و در نتیجه بی‌تحرکی هر دو گونه آرسنیت و آرسنات شود[۴۴].

۲) کودهای آلی:

کودهای آلی با تغییر خواص خاک مانند افزایش ماده آلی و افزایش pH، موجب کاهش فراهمی‌زیستی، تحرک و سمیت گیاهی فلزات سنگین نظیر آرسنیک می‌شوند[۴۵، ۴۶]. کودهای آلی همچنین از طریق تشکیل کمپلکس‌های پایدار با گروه‌های عاملی هیدروکسید یا کربوکسیل، قادر به تثبیت آرسنیک در خاک هستند[۴۷]. در آزمایشی اثر اصلاح‌کننده‌های ارگانیک مانند بقایای گیاهی، کمپوست و ورمی‌کمپوست بر تجمع آرسنیک در برنج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ورمی‌کمپوست به‌طور قابل‌توجهی موجب کاهش آرسنیک در دانه برنج می‌شود[۴۸]. نتایج پژوهشی نشان داد که استفاده تلفیقی از کودهای آلی مختلف منجر به کاهش ۳۳/۴۷ درصدی آرسنیک در دانه برنج شد[۴۹]. در آزمایشی دیگر اثر اصلاح‌کننده‌های ارگانیک (کمپوست، ورمی‌کمپوست و کود دامی) همراه با مدیریت آبیاری بر کاهش تجمع آرسنیک در دانه برنج در هند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ورمی‌کمپوست همراه با آبیاری تناوبی، از کارایی بالایی برای کاهش سطوح آرسنیک در دانه برنج برخوردار است[۵۰]. محققان گزارش

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

کردند که استفاده از کود گاوی یا گوسفندی سبب کاهش فراهمی‌زیستی آرسنیک و کادمیوم در خاک شده و انتقال آن‌ها از خاک به گیاه را به تأخیر می‌اندازد[۵۱].

استفاده از اصلاح‌کننده‌های غیرارگانیک

۱) آهن:

آهن به‌عنوان یک ماده مغذی ضروری برای رشد و نمو برنج، با تأثیر بر گونه‌زایی و تحرک آرسنیک، نقش مهمی در کنترل تنش ناشی از آرسنیک در اراضی شالیزاری ایفا می‌کند[۹]. در شرایط هوازی، آرسنیک به‌صورت آرسنات وجود دارد و به شدت از طریق اکسیدهای آهن جذب می‌شود که این امر منجر به کاهش تحرک آرسنیک و قابلیت دسترسی آن برای گیاه می‌شود[۵۲]. در حالی‌که تحت شرایط بی‌هوازی، تحرک و فراهمی‌زیستی آرسنیت به‌دلیل انحلال احیاءکننده اکسی هیدروکسید آهن، افزایش می‌یابد. با این حال، کاربرد آهن از طریق رسوب اکسید آهن یا تشکیل پلاک‌های آهن در سطح ریشه برنج می‌تواند باعث کاهش فراهمی‌زیستی آرسنیک در شرایط بی‌هوازی شود[۵۳، ۵۴]. تشکیل پلاک آهن نقش مهمی در کاهش جذب و انتقال آرسنیک از ریشه به ساقه برنج ایفا می‌کند، زیرا میل ترکیبی بالایی با آرسنیت دارد[۹]. در آزمایشی اثر کاربرد اکسید آهن (۵۶ درصد آهن) و نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی (۹۰ درصد آهن) بر تجمع آرسنیک در دانه‌های برنج در خاک حاوی ۳۹/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد اکسید آهن و نانو ذرات آهن به‌ترتیب موجب کاهش ۴۷ و ۵۱ درصدی تجمع آرسنیک در دانه برنج شد[۵۵]. کاهش جذب و تجمع آرسنیک در گیاه برنج با کاربرد آهن توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است[۵۶، ۵۷، ۵۸].

۲) سیلیکون:

سیلیکون (Si) یک عنصر مفید برای برنج است که از طریق افزایش باروری سنبلچه‌ها، باعث بهبود عملکرد محصول می‌شود. سیلیکون متابولیسم اولیه را تغییر می‌دهد و به انتقال مجدد اسیدهای آمینه در برنج کمک می‌کند[۵۹]. با توجه به اینکه سیلیکون با آرسنیت برای مکان‌های جذب در خاک رقابت می‌کند، سطوح بالای سیلیکون در خاک، جذب آرسنیت توسط برنج را کاهش می‌دهد[۶۰]. محققان گزارش کردند که استفاده از سیلیکون یک استراتژی بالقوه برای کاهش سمیت و تجمع آرسنیک در گیاه برنج است[۵۴، ۵۹، ۶۱]. از دلایل اصلی کاهش تجمع آرسنیک با کاربرد سیلیکون می‌توان به تغییر بیان ژن‌های مسئول جذب و انتقال Lsi2 و Lsi1، تشکیل پلاک‌های آهن در سطح ریشه و بهبود فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاه برنج اشاره کرد[۶۲، ۶۳]. Wang و همکاران (۲۰۱۶)[۶۴] گزارش کردند که استفاده از سیلیکون به‌طور قابل توجهی موجب کاهش محتوای آرسنیک (۲۰/۱ درصد) در دانه برنج در مقایسه با تیمار شاهد شد. نتایج آزمایشی دیگر نشان داد که کاربرد سیلیکون، تجمع آرسنیک در کاه، پوسته و دانه برنج را به‌ترتیب به میزان ۷۸، ۵۰ و ۱۶ درصد کاهش داد[۶۵].

۳) گوگرد:

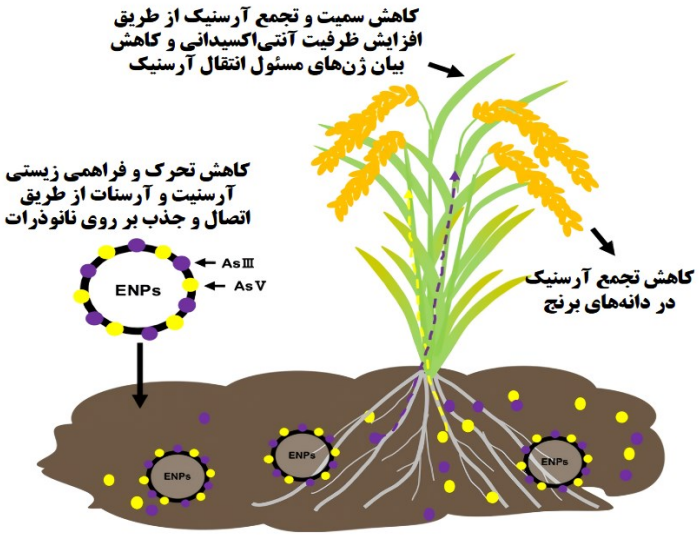
گوگرد به‌دلیل سنتز لیگاندهای مانند گلوتاتیون (GSH) و فیتوکلاتین‌ها (PCs) می‌تواند نقش مؤثری در تشکیل کمپلکس و حبس آرسنیت و در نتیجه کاهش سمیت، تجمع و انتقال آن در گیاه برنج ایفا کند[۶۶، ۶۷]. کاهش تجمع و انتقال آرسنیک با کاربرد گوگرد به سه مکانیسم نسبت داده می‌شود. ۱- گوگرد موجب تشکیل پلاک‌های آهن در ریزوسفر و سطح ریشه برنج می‌گردد[۶۸]. ۲- سولفات (SO_4) می‌تواند باعث افزایش دفع آرسنات از پلاک‌های آهن و رسوب آرسنیک به‌صورت سولفید آرسنیک نامحلول در محیط ریزوسفری برنج شود[۳]. ۳- سولفات می‌تواند از طریق رقابت، انتقال آرسنات به داخل سلول‌ها را محدود کند[۶۹]. نتایج پژوهشی نشان داد که کاربرد گوگرد به‌ترتیب موجب کاهش ۳۲ و ۱۱ درصدی تجمع آرسنیک در ریشه و اندام‌هوایی برنج شد[۷۰]. کاهش تجمع آرسنیک با کاربرد گوگرد توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است[۷۱، ۷۲].

استفاده از فناوری نانو

یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری نانو استفاده از ترکیبات نانو برای بهبود پایداری کشاورزی و حل مشکلات زیست‌محیطی از جمله پالایش فلزات سنگین از منابع آب

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

و خاک است[۷۳]. جذب سطحی و یا تثبیت فلزات سنگین در خاک به‌وسیله ذرات نانو به‌عنوان روشی نوین برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مطرح شده است[۷۴]. استفاده از ترکیبات نانو مانند نانوذرات اکسید روی (ZnO NPs)، نانوذرات اکسید مس (CuO NPs)، نانوذرات اکسید منگنز (MnO2 NPs) و نانوذرات سیلیکا (SiO2 NPs) می‌تواند باعث کاهش غلظت آرسنیک در برنج شود. ظرفیت جذب بالای نانوذرات، رسوب و کاهش فراهمی‌زیستی آرسنیک می‌تواند از دلایل اصلی کاهش محتوای آرسنیک در برنج با کاربرد نانوذرات باشد[۳، ۶]. مکانیسم‌های کاهش سمیت و تجمع آرسنیک در دانه‌های برنج با کاربرد نانوذرات در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. شماتیک اثر کاربرد نانوذرات بر سمیت و تجمع آرسنیک در دانه‌های برنج[۶]

در آزمایشی گزارش شد که تیمار بوته‌های برنج کشت شده در محیط هیدروپونیک با نانوذرات اکسید روی به‌ترتیب باعث کاهش ۷۲ و ۶۸ درصدی گونه‌های آرسنیت و آرسنات در ریشه برنج شد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۸). نتایج محققان دیگر نیز بیانگر کاهش قابل‌توجه‌ای در محتوای آرسنیک ریشه و اندام‌های هوایی برنج با کاربرد نانوذرات اکسید روی بود[۴۰، ۷۵]. جذب آرسنیک بر روی نانوذرات اکسید روی، اثر هم‌افزایی نانوذرات اکسید روی و آرسنیک و تداخل در تولید گونه‌های ROS، از دلایل اصلی کاهش جذب گیاهی آرسنیک با کاربرد نانوذرات روی ذکر شده است[۴۰]. نتایج بررسی اثر نانوذرات اکسید مس بر غلظت آرسنیک در برنج نشان داد که استفاده از این نانوذرات منجر به کاهش غلظت آرسنیک در ریشه (۲۳ درصد) و اندام هوایی (۴۵ درصد) برنج شد[۷۶]. در آزمایشی دیگر کاهش غلظت آرسنیک در دانه برنج با کاربرد نانوذرات اکسید مس گزارش شده است[۷۷]. در پژوهشی اثر کاربرد نانوذرات سیلیکا بر سمیت آرسنیک و غلظت آن در دانه‌های برنج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوذرات سیلیکا به‌ترتیب باعث کاهش ۲۸ و ۴۰ درصدی آرسنیک در دانه برنج تحت شرایط گلدانی و مزرعه‌ای شد[۷۸]. محققان کارایی نانوذرات سیلیکا را همراه با آبیاری تناوبی در کاهش محتوای آرسنیک (۷۰ درصد) در برنج گزارش کردند[۷۹]. نانوذرات سیلیکا از طریق تغییر بیان ژن‌های مسئول جذب و انتقال Lsi2 و Lsi1 در ریشه، می‌تواند موجب کاهش جذب آرسنیک در ریشه و انتقال آن به اندام‌های هوایی شود[۳]. نتایج پژوهش‌های دیگر نیز بیانگر کاهش محتوای آرسنیک در گیاه برنج با کاربرد نانوذرات می‌باشد (جدول ۲).

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

جدول ۲. اثر نانوذرات مختلف بر محتوای آرسنیک در گیاه برنج

نانوذرات	دوزهای اعمال شده	محیط رشد	تأثیر	منابع
ZnO	۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر	هیدروپونیک	کاهش ۶۸ درصدی محتوای آرسنیک در ریشه	(۸۰)
CuO	۱۰۰-۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر	خاک	کاهش ۳۵ درصدی محتوای آرسنیک در شلتوک	(۸۱)
MnO_2	۲ -۰/۲ درصد	خاک	کاهش ۶۵/۴ درصدی محتوای آرسنیک در دانه	(۸۲)
SiO_2	۱۰ -۰/۱ میکرومولار	هیدروپونیک	کاهش سطح بیان ژن‌های Lsi1 و Lsi2	(۸۳)
α-MnO_2	۲-۰/۲ درصد وزنی/ وزنی	هیدروپونیک	کاهش معنی‌دار محتوای آرسنیک در ریشه و شلتوک	(۸۴)
TiO_2	۱۰۰-۰ میلی‌گرم بر لیتر	هیدروپونیک	کاهش ۴۰ تا ۹۰ درصدی محتوای آرسنیک در دانه	(۸۵)

استفاده از میکروارگانیسم‌ها

بسیاری از میکروارگانیسم‌های خاک در برابر سمیت فلزات سنگین مقاوم هستند. میکروارگانیسم‌ها می‌توانند اشکال سمی فلزات را به اشکال کمتر سمی تبدیل کنند و از طریق مکانیسم‌های مختلف فراهمی‌زیستی این فلزات را برای گیاهان کاهش دهند[۸۶، ۸۷]. میکروارگانیسم‌های خاک، گونه‌های آرسنیک را از طریق جذب در سطح خارج سلولی به ترکیبات کمتر سمی مانند مونومتیل آرسونیک اسید، دی‌متیل آرسنیک اسید و تری‌متیل آرسین اکسید تبدیل می‌کنند[۵۴، ۸۸]. یکی دیگر از مکانیسم‌های احتمالی کاهش سمیت آرسنیک توسط میکروارگانیسم‌ها، تشکیل هیدروکسیدهای آهن آمورف بر روی سطوح سلولی است[۸۹]. جذب اشکال معدنی و آلی آرسنیک توسط باکتری‌ها و در نتیجه کاهش فراهمی‌زیستی آن‌ها برای برنج با کاربرد *Bacillus* sp.، *Rhodococcus* sp. و *Halobacterium* sp. گزارش شده است[۵۴، ۹۰]. محققان گزارش کردند که میکروب‌ها در خاک‌های شالیزاری موجب اکسید آرسنیت به آرسنات شده و در نتیجه درجه سمیت آرسنیک را برای برنج کاهش می‌دهند[۹۱]. نتایج پژوهش‌های مختلف بیانگر تأثیر مثبت قارچ‌های میکوریزای آربوسکولار (AMF) بر کاهش سمیت آرسنیک در گیاه برنج است[۹۲، ۹۳]. نتایج آزمایشی نشان داد که تلقیح ریزوباکتر As5 *Ochrobactrum tritici*، جذب و تجمع آرسنیک در بافت‌های برنج را ۲/۶ برابر نسبت به تیمار شاهد کاهش داد[۹۴].

گزینش و اصلاح ارقام برنج با انباشت کم آرسنیک

گزینش و اصلاح ارقام با انباشت کم آرسنیک که با شرایط محیطی سازگار باشند، راهکار مناسبی برای کشت برنج در مناطق آلوده به آرسنیک است[۴۴]. تنوع ژنتیکی قابل توجه‌ای از لحاظ میزان و نوع آرسنیک در بین ارقام برنج گزارش شده است. نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای در بنگلادش بیانگر وجود تنوع ۴ تا ۴/۶ برابری آرسنیک کل در دانه ۷۶ رقم برنج شامل ارقام محلی و اصلاح شده، بود[۹۵]. در آزمایشی دیگر میزان آرسنیک تجمع یافته در دانه ۲۵ رقم برنج طی سه فصل زراعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت آرسنیک کل و نوع آرسنیک تجمع یافته در دانه ارقام برنج، متفاوت بود. بر اساس نتایج، سهم ژنوتیپ بر تنوع غلظت آرسنیک کل دانه، ۷۰ درصد بود[۹۶]. نتایج بررسی Norton و همکاران (۲۰۱۲)[۹۷] نشان داد که واریته‌های برنج با طول دوره رویشی طولانی‌تر در مقایسه با واریته‌هایی که طول دوره رویشی کوتاه‌تری دارند، آرسنیک کمتری را در دانه‌های خود انباشته می‌کنند. یافته‌های محققان نشان داد که ارقام هیبرید برنج در مقایسه با ارقام غیرهیبرید، مقادیر بیشتری از آرسنیک را در دانه‌های

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

خود انباشته می‌کنند[۹۸]. مکان‌یابی ژن‌های کنترل‌کننده صفات کمی (QTLs) یک رویکرد ژنتیکی مناسب برای شناسایی موقعیت، تعداد و اثرات عوامل ژنتیکی کنترل کننده غلظت آرسنیک در گیاه برنج است و می‌توان از آن برای اصلاح و توسعه ارقام جدید برنج با تجمع کم آرسنیک استفاده نمود[۹۹، ۱۰۰].

بحث

کشت برنج در خاک‌هایی که به‌طور طبیعی و از نظر زمین‌شناسی غنی از آرسنیک هستند و آبیاری اراضی شالیزاری با آب‌های زیرزمینی آلوده به آرسنیک، از دلایل اصلی انباشت این فلز سنگین در دانه برنج به‌شمار می‌رود. بیوشیمی خاص خاک شالیزار موجب تحرک بالای آرسنیک و در نتیجه جذب آن توسط گیاه برنج می‌شود[۱۳]. برنج نسبت به سایر غلات از پتانسیل بیشتری برای جذب و انباشت آرسنیک برخوردار است. بنابراین، رژیم غذایی مبتنی بر برنج به‌عنوان یک تهدید جدی برای سلامتی انسان در اثر سمیت آرسنیک می‌باشد[۱۰۱]. از این‌رو، توسعه روش‌هایی برای اصلاح خاک‌های شالیزاری آلوده به آرسنیک امری ضروری است. آرسنیک به هر دو شکل معدنی و آلی در خاک وجود دارد. اشکال معدنی آرسنیک (آرسنیت و آرسنات) از سمیت بیشتری برخوردار هستند[۲۶]. آرسنیت، گونه غالب آرسنیک در خاک‌های شالیزاری است. با این حال، آرسنیت می‌تواند از طریق واکنش‌هایی مانند متیلاسیون به اشکال آلی و کمتر سمی که میزان جذب آن‌ها توسط برنج کمتر است، تبدیل شود[۹]. سمیت آرسنیک منجر به کاهش محتوای کلروفیل برگ و سرعت فتوسنتز، تعداد پنجه کمتر، کاهش وزن دانه و در نهایت کاهش عملکرد و کیفیت برنج می‌شود[۱۰۲].

خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مانند بافت خاک، میزان ماده آلی، pH و پتانسیل ردوکس از جمله فاکتورهای مؤثر بر میزان سمیت، حلالیت و فراهمی‌زیستی آرسنیک به‌شمار می‌روند[۳۹]. چرخه بیوژئوشیمیایی آرسنیک در شرایط شالیزاری به‌شدت تحت تأثیر پتانسیل ردوکس خاک قرار می‌گیرد[۱۰۳]. پتانسیل ردوکس خاک بر گونه‌زایی و تحرک گونه‌های آرسنیک مؤثر است. کاهش پتانسیل ردوکس به‌دلیل شرایط غرقابی شالیزار، منجر به افزایش تحرک آرسنیک در خاک می‌شود[۱۰۴]. در خاک‌های دارای مقادیر زیاد ماده آلی، حلالیت و فراهی‌زیستی آرسنیک کاهش می‌یابد که دلیل این امر به تشکیل کمپلکس و در نتیجه میل به جذب بیشتر آرسنیک نسبت داده شده است[۱۰۵]. نتایج پژوهش‌ها بیانگر کاهش غلظت آرسنیک در دانه‌های برنج کشت شده در خاک‌های شالیزاری دارای مقادیر بالای ماده آلی است[۱۰۵، ۱۰۶]. تجمع آرسنیک در دانه برنج و ورود آن به زنجیره غذایی انسان را می‌توان از طریق استراتژی‌های مختلف زراعی نظیر مدیریت آب، استفاده از اصلاح‌کننده‌های ارگانیک و غیرارگانیک، استفاده از میکروارگانیسم‌ها و گزینش ارقام برنج با انباشت کم آرسنیک، به‌حداقل رساند. مزایا و معایب روش‌های مختلف کاهش غلظت آرسنیک در گیاه برنج در جدول ۳ نشان داده شده است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

جدول ۳. مقایسه روش‌های مختلف کاهش غلظت آرسنیک در گیاه برنج

روش مورد استفاده	مزایا	معایب
آبیاری تناوبی	صرفه جویی در مصرف آب، تهویه مطلوب خاک، کارایی بالا و سازگار با محیط‌زیست	نظارت بیشتر بر آبیاری و نیاز به مبارزه بیشتر با علف‌های هرز
بیوچار	افزایش مواد آلی، بهبود خصوصیات خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب، پایدار و سازگار با محیط‌زیست	فرایند پیچیده تولید، کیفیت و کارایی متفاوت، هزینه زیاد تولید و کاربرد دشوار در مقیاس بزرگ و شرایط مزرعه‌ای
کودهای آلی	اصلاح خاک، افزایش تهویه خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی، کاهش آلودگی زیست‌محیطی و کارایی بالا	احتمال آلودگی به عوامل بیماری‌زا
فناوری نانو	جذب مؤثر فلز به‌دلیل سطح ویژه بالا	هزینه زیاد و اثرات جانبی بر انسان و محیط زیست
گزینش و اصلاح ارقام برنج با انباشت کم	هزینه کم و سازگار با محیط‌زیست	امکان کاهش عملکرد کمی و کیفی برنج

مدیریت مناسب آب در شالیزار علاوه بر بهبود کارایی مصرف آب، تأثیر به‌سزایی در کاهش تجمع آرسنیک در دانه برنج دارد. تحرک آرسنیک در شرایط بی‌هوازی خاک شالیزار، موجب افزایش آرسنیک قابل‌دسترس برای گیاه برنج و در نتیجه تجمع بیش از حد آن در دانه می‌شود. در مقابل در شرایط هوازی، میزان آرسنیک موجود در محلول خاک ناچیز است[۲۴]. بنابراین، حفظ شرایط هوازی (آبیاری تناوبی) در طول مراحل مختلف رشد برنج می‌تواند موجب بی‌تحرکی آرسنیک در محلول خاک، تشکیل پلاک‌های آهن در سطح ریشه، کاهش تجمع آرسنیک در ریشه و در نتیجه کاهش انتقال آن به دانه برنج در مقایسه با شرایط غرقابی شود[۵۴، ۱۰۷]. از طرف دیگر، به‌دلیل کاهش مصرف آب در روش تناوبی، میزان آرسنیک ورودی به مزرعه در اثر مصرف آب‌های زیرزمینی کاهش خواهد یافت و در نتیجه میزان انتقال آرسنیک به گیاه برنج کاهش می‌یابد[۲۴]. استفاده از بیوچار یک روش مدیریتی مناسب برای کنترل فراهمی‌زیستی آرسنیک در شالیزار به‌شمار می‌رود. اثربخشی بیوچار به عوامل مختلفی مانند دمای تجزیه حرارتی، pH خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، محتوای مواد مغذی و حضور گروه‌های عاملی در بیوچار بستگی دارد[۱۰۸].

کاربرد میکروارگانیسم‌ها از دیگر روش‌های مناسب برای کاهش سمیت و تجمع آرسنیک در برنج در نظر گرفته می‌شود. میکروارگانیسم‌های موجود در خاک، غلظت مواد معدنی را از طریق کاهش تحرک، تنظیم می‌کنند که به نوبه خود بر میزان فراهمی و تحرک آرسنیک تأثیر می‌گذارد. پتانسیل پیوند هیدروژنی اورونیک اسیدها، پروتئین‌ها و قندهای آمینه در سطوح خارجی میکروارگانیسم‌ها، سم‌زدایی گونه‌های آرسنیک را تسهیل می‌کند[۱۰۹]. استفاده از اصلاح‌کننده‌های غیرارگانیک مانند آهن، سیلیکون و گوگرد در خاک‌های شالیزاری آلوده به آرسنیک می‌تواند از طریق فرآیندهایی مانند تشکیل پلاک‌های آهن در سطح ریشه و ایجاد کمپلکس، باعث رسوب و کاهش تحرک و فراهمی‌زیستی آرسنیک در محلول خاک و در نتیجه کاهش جذب آن توسط برنج شود. جذب آرسنیت در برنج معمولاً از طریق مسیر انتقال سیلیسیم صورت می‌گیرد. بنابراین، استفاده از سیلیکون در خاک برای کاهش انتقال آرسنیک از

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

خاک و آب آبیاری به برنج پیشنهاد می‌شود[۹۱]. گزارش شده که تجمع آرسنیک در برنج به‌طور قابل‌توجهی در بین ارقام مختلف حتی تحت شرایط یکسان، متفاوت است[۳۹]. تجمع آرسنیک در دانه برنج تابع برخی از عوامل کنترل کننده است که جذب و انتقال آرسنیک از ریشه به دانه را کنترل کرده و موجب ایجاد تفاوت بین ژنوتیپ‌های برنج می‌شود. ویژگی‌های ریزوسفر نیز در ایجاد تفاوت بین ژنوتیپ‌ها نقش دارند[۴۴]. نتایج بررسی‌ها نشان‌دهنده همبستگی منفی معنی‌دار بین میزان تجمع آرسنیک در دانه برنج با منافذ روی سطح ریشه یا میزان آزادسازی اکسیژن از ریشه ارقام برنج است. با وجود نامشخص بودن سازوکار این همبستگی، به‌نظر می‌رسد که در ارقامی که قادر به انتشار اکسیژن بیشتری از ریشه هستند، پتانسیل اکسیداسیون احیای ریزوسفر در سطح بالاتری حفظ شده و رسوب آهن بیشتری روی سطح ریشه تشکیل می‌شود که در اثر آن، جذب آرسنیک توسط برنج کاهش می‌یابد[۱۱۰، ۱۱۱]. بنابراین، انتخاب و اصلاح ارقام با انباشت کم آرسنیک می‌تواند روش مناسبی برای کاهش تجمع این فلز در برنج باشد. البته به این نکته باید توجه کرد که ارقام اصلاح شده باید از عملکرد کمی و کیفی قابل قبولی نیز برخوردار بوده تا بر پایداری تولید برنج اثر منفی نداشته باشند.

همانطور که اشاره شد روش‌های مختلفی برای کاهش انباشت آرسنیک در برنج وجود دارد. با این حال، برخی از این روش‌ها ممکن است در شرایط کنترل‌شده به‌عنوان یک استراتژی امیدوارکننده مطرح باشند و در شرایط مزرعه‌ای به‌دلیل الگوی رفتاری پیچیده آرسنیک و عوامل دیگر، از کارایی مشابهی برخوردار نباشند. بنابراین، نیاز مبرم به توسعه یک استراتژی عملی و قابل اجرا، مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست احساس می‌شود. در همین‌راستا، استفاده از یک روش زراعی مبتنی بر مدیریت آب در ترکیب با سایر روش‌ها، از جمله استفاده از آبیاری تناوبی همرا با کاربرد کودهای آلی یا ارقام با انباشت کم آرسنیک، به‌عنوان یک روش کاربردی قابل توصیه است.

نتیجه‌گیری

آلودگی آرسنیک در برنج، به‌دلیل اثرات بهداشتی آن به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است. بنابراین، ارائه راهکارهایی به‌منظور کاهش تجمع آرسنیک در برنج برای حفظ ایمنی مواد غذایی ضروری است. نتایج این مطالعه نشان داد که حلالیت، تحرک و فراهمی‌زیستی آرسنیک در خاک‌های شالیزاری تحت تأثیر عواملی هم‌چون بافت خاک، میزان ماده آلی در خاک، پتانسیل ردوکس و pH قرار می‌گیرد. شیوه‌های مدیریت آب از جمله آبیاری تناوبی می‌توانند به‌طور قابل توجهی باعث کاهش تجمع آرسنیک در دانه‌های برنج شوند. همچنین، سمیت و جذب آرسنیک در برنج را می‌توان با استفاده از اصلاح‌کننده‌های ارگانیک مانند بیوچار و کودهای آلی و اصلاح‌کننده‌های غیرارگانیک مانند آهن، سیلیکون و گوگرد کاهش داد. استفاده از ترکیبات نانو مانند نانوذرات اکسید روی، اکسید مس، اکسید منگنز و سیلیکا، روش دیگری برای کاهش غلظت آرسنیک در دانه برنج است. علاوه بر این، انتخاب ارقام برنج کم انباشته کننده آرسنیک و کاربرد میکروارگانیسم‌ها، از دیگر روش‌های مؤثر برای کاهش جذب آرسنیک توسط برنج و تولید محصول ایمن به‌شمار می‌روند. در مجموع، نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از آبیاری تناوبی همرا با کاربرد کودهای آلی یا ارقام با انباشت کم آرسنیک می‌توانند به‌عنوان یک روش عملی و قابل اجرا به‌منظور کاهش جذب و تجمع آرسنیک در دانه برنج مورد استفاده قرار گیرد.

پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده

۱- انجام تحقیقات بنیادی و کاربردی مبتنی بر شرایط مزرعه‌ای

۲- بررسی اقتصادی روش‌های کاهش غلظت آرسنیک در برنج

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

۳- پایش منابع آبی مورد استفاده برای اراضی شالیزاری از جمله آب رودخانه‌ها و سدها از نظر میزان آلودگی به آرسنیک

۴- بررسی میزان آلودگی آرسنیک در اراضی شالیزاری استان‌های شمالی کشور و ارائه راهکار متناسب با اقلیم هر منطقه

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و موسسه تحقیقات برنج کشور نهایت تشکر را دارند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی

تمامی هزینه‌های انجام شده در این مطالعه، از محل منابع شخصی تأمین شده است.

ملاحظات اخلاقی

با توجه به مروری بودن مطالعه، هیچ نیازی به دریافت اطلاعات از اشخاص و یا مداخلات بالینی نبوده است؛ لذا الزام وجود کد طرح برای مطالعه حاضر، صدق نمی‌کند.

مشارکت نویسندگان

ایده‌پردازی و نگارش پیش‌نویس مقاله: سجاد شاکرکوهی

طراحی مطالعه: محمد ربیعی

روش کار: سجاد شاکرکوهی

نظارت بر اجرای کار: محمد ربیعی

ویرایش و جمع‌بندی نهایی مقاله: محمد ربیعی

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

References

1. Bundschuh J, Niazi NK, Alam MA, et al. Global arsenic dilemma and sustainability. Journal of Hazardous Materials 2022;436: 129197.
2. Chen WQ, Shi YL, Wu SL, et al. Anthropogenic arsenic cycles: A research framework and features. Journal of Cleaner Production 2016;139: 328-336.
3. Singh S, Rajput VD, Upadhyay SK, et al. Arsenic Contamination in Rice Agro-ecosystems: Mitigation Strategies for Safer Crop Production. Journal of Plant Growth Regulation 2023;42: 6413–6424.
4. Saha A, Sen Gupta B, Patidar S, et al. Identification of Soil Arsenic Contamination in Rice Paddy Field Based on Hyperspectral Reflectance Approach. Soil System 2022;6: 30.
5. Mandal J, Sengupta S, Sarkar S, et al. Meta-Analysis Enables Prediction of the Maximum Permissible Arsenic Concentration in Asian Paddy Soil. Frontiers in Environmental Science 2021;9: 760125.
6. Mawia AM, Hui S, Zhou L, et al. Inorganic arsenic toxicity and alleviation strategies in rice. Journal of Hazardous Materials 2021;408: 124751.
7. Tripathi RD, Tripathi P, Dwivedi S, et al. Arsenomics: omics of arsenic metabolism in plants. Frontiers in Physiology 2012;23: 3-275.
8. Souri Z, Karimi N, de Oliveira LM. Antioxidant enzymes responses in shoots of arsenic hyperaccumulator, Isatis cappadocica Desv., under interaction of arsenate and phosphate. Environmental Technology 2018;39: 1316-1327.
9. Mitra A, Chatterjee S, Moogouei R, et al. Arsenic Accumulation in Rice and Probable Mitigation Approaches: A Review. Agronomy 2017;7(4): 67.
10. Shikawa S, Arao T, Makino T. Agronomic strategies for reducing arsenic risk in rice, in Arsenic Contamination in Asia, (eds) Yamauchi H, Sun G. Singapore: Springer, 2019; 181-198.
11. Liu J, Liu HB, Liu R, et al. Water Quality in Irrigated Paddy Systems. Irrigation in Agroecosystems. Intech Open, London, United Kingdom; 2018.
12. Uda MNA, Gopinath SCB, Hashim U, et al. Controlling Arsenic Accumulation in Rice Grain under Nanomaterials-Assisted Optimal Greenhouse Set-Up. Sustainability 2023;15(3): 2633.
13. Ali W, Rasool A, Junaid M, et al. A comprehensive review on current status, mechanism, and possible sources of arsenic contamination in groundwater: a global perspective with prominence of Pakistan scenario. Environ Geochem Health 2019;41: 737-760.
14. Shaji E, Santosh M, Sarath K, et al. Arsenic contamination of groundwater: a global synopsis with focus on the Indian Peninsula. Geoscience Frontiers 2021;12: 101079.
15. Shaker Kouhi S, Rabiee M. Effect of intercropping on the Cd accumulation in soil and rice plants: A review. Journal of Environmental Health Engineering 2024;11(3): 287-301 [in Persian].
16. 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. Environmental Science and Technology 2016;50: 4178-4185.
17. Williams PN, Villada A, Deacon C, et al. Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley. Environmental Science and Technology 2007;41: 6854-6859.
18. Gonzalez ME, Stahl C, Cruz MT, et al. Contrasting the size-resolved nature of particulate arsenic, cadmium, and lead among diverse regions. Atmospheric Pollution Research 2021;48: 85-95.
19. Majumdar A, Barla A, Upadhyay MK, et al. Vermiremediation of metal (loid)s via Eichornia crassipes phytomass extraction: a sustainable technique for plant amelioration. Journal of Environmental Management 2018;220: 118-125.
20. Norton GJ, Adomako EE, Deacon CM et al. Effect of organic matter amendment, arsenic amendment and water management regime on rice grain arsenic species. Environmental Pollution 2013;177: 38-47.
21. Takahashi Y, Minamikawa R, Hattori KH, et al. Arsenic behaviour in paddy fields during the cycle of flooded and non-flooded periods. Environmental Science and Technology 2004;38: 1038-1044.
22. Yamaguchi N, Nakamura T, Dong D, et al. Arsenic release from flooded paddy soils is influenced by speciation, Eh, pH, and iron dissolution. Chemosphere 2011;83: 925-932.
23. Di X, Beesley L, Zhang Z, et al. Microbial arsenic methylation in soil and uptake and metabolism of methylated arsenic in plants: a review. International Journal of Environmental Research and Public Health 2019;16: 1-13.
24. Harine IJ, Islam MR, Hossain M, et al. Arsenic accumulation in rice grain as influenced by water management: human health risk assessment. Agronomy 2021;11(9): 1741.
25. Majumdar A, Upadhyay MK, Giri B, et al. Arsenic dynamics and flux assessment under drying-wetting irrigation and enhanced microbial diversity in paddy soils: A four year study in Bengal delta plain. Journal of Hazardous Materials 2021;409: 124443.
26. Szaloki T, Szekely, A, Valkovszki NJ, et al. Strategies for Reducing Arsenic Content in Rice: A review. Journal of Central European Green Innovation, 2023;11(1): 55-66.
27. Norton GJ, Travis AJ, Talukdar P, et al. Genetic loci regulating arsenic content in rice grains when grown flooded or under alternative wetting and drying irrigation. Rice 2019;12(1): 54.
28. Somenahally AC, Hollister EB, Yan W, et al. Water management impacts on arsenic speciation and iron-reducing bacteria in contrasting rice-rhizosphere compartments. Environmental Science and Technology 2011;45: 8328-8335.
29. Zong Y, Xiao Q, Malik Z, et al. Crop straw-derived biochar alleviated cadmium and copper phytotoxicity by reducing bioavailability and accumulation in a field experiment of rice-rape-corn rotation system. Chemosphere 2021;280: 130830.
30. Ahmad M, Ahmad M, Usman AR, et al. Date palm waste-derived biochar composites with silica and zeolite: synthesis, characterization and implication for carbon stability and recalcitrant potential. Environmental Geochemistry and Health 2019;41: 1687-1704.
31. Wu J, Li Z, Wang L, et al. A novel calcium-based magnetic biochar reduces the accumulation of as in grains of rice (*Oryza sativa* L.) in As-contaminated paddy soils. Journal of Hazardous Materials 2020;394: 122507.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

32. Rajput VD, Kumari A, Minkina T, et al. An assessment of integrated role of biochars and nanoparticles in soil remediation processes. Environmental Geochemistry and Health 2022;45: 9435-9449.
33. Pan D, Liu C, Yu H, et al. A paddy field study of arsenic and cadmium pollution control by using iron-modified biochar and silica sol together. Environmental Science and Pollution Research 2019;26(24): 24979-24987.
34. Leksungnoen P, Wisawapipat W, Ketrot D, et al. Biochar and ash derived from silicon-rich rice husk decrease inorganic arsenic species in rice grain. Science of the Total Environment 2019;684: 360-370.
35. Lian F, Liu X, Gao M, et al. Effects of Fe-Mn-Ce oxide–modified biochar on as accumulation, morphology, and quality of rice (*Oryza sativa* L.). Environmental Science and Pollution Research 2020;27(15): 18196-18207.
36. Jin W, Wang Z, Sun Y, et al. Impacts of biochar and silicate fertilizer on arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). Ecotoxicology and Environmental Safety 2020;189: 109928.
37. Jing F, Yang Z, Chen X, et al. Potentially hazardous element accumulation in rice tissues and their availability in soil systems after biochar amendments. Journal of Soils and Sediments 2019;19(7): 2957-2970.
38. Qiao J, Yu H, Wang X, et al. The applicability of biochar and zero-valent iron for the mitigation of arsenic and cadmium contamination in an alkaline paddy soil. Biochar 2019;1(2): 203-212.
39. Moulick D, Samanta S, Sarkar S, et al. Arsenic contamination, impact and mitigation strategies in rice agro-environment: An inclusive insight. Science of the Total Environment 2021;800: 149477.
40. Wu F, Fang Q, Yan S, et al. Effects of zinc oxide nanoparticles on arsenic stress in rice (*Oryza sativa* L.): germi- nation, early growth, and arsenic uptake. Environmental Science and Pollution Research 2020;27(21): 26974-26981.
41. Wu L, Wei C, Zhang S, et al. MgO-modified biochar increases phosphate retention and rice yields in saline-alkaline soil. Journal of Cleaner Production 2019;235: 901-909.
42. Chen Y, Han YH, Cao Y, et al. Arsenic transport in rice and biological solutions to reduce arsenic risk from rice. Frontiers in Plant Science 2017;8: 268.
43. Zheng RL, Cai C, Liang JH, et al. The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the acumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. Chemosphere 2012;89(7): 856-862.
44. Kumarathilaka P, Seneweera S, Ok YS, et al. Mitigation of arsenic accumulation in rice: an agronomical, physico-chemical, and biological approach–a critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 2019;50(1): 31-71.
45. Hou S, Zheng N, Tang L, et al. Effect of soil pH and organic matter content on heavy metals availability in maize (*Zea mays* L.) rhizospheric soil of nonferrous metals smelting area. Environmental Monitoring and Assessment 2019;191: 634.
46. Wan Y, Huang Q, Wang Q, et al. Accumulation and bioavailability of heavy metals in an acid soil and their uptake by paddy rice under continuous application of chicken and swine manure. Journal of Hazardous Materials 2020;384: 121293.
47. Sun N, Thompson RB, Xu J, et al. Arsenic and Cadmium Accumulation in Soil as Affected by Continuous Organic Fertilizer Application: Implications for Clean Production. Agronomy 2021;11(11): 2272.
48. Sinha B, Bhattacharyya K. Arsenic accumulation and specia- tion in transplanted autumn rice as influenced by source of irrigation and organic manures. International Journal of Bio-resource and Stress Management 2014;5(3): 363-368.
49. Islam S, Rahman MM, Naidu R. Impact of water and fertilizer management on arsenic bioaccumulation and speciation in rice plants grown under greenhouse conditions. Chemosphere 2019;214: 606-613.
50. Sengupta S, Bhattacharyya K, Mandal J, et al. Deficit irrigation and organic amendments can reduce dietary arsenic risk from rice: introducing machine learning- based prediction models from field data. Agriculture, Ecosystems and Environment 2021;39: 107516.
51. Gul S, Naz A, Fareed I, et al. Reducing heavy metals extraction from contaminated soils using organic and inorganic amendments—A review. Polish Journal of Environmental Studies 2015;24: 1423-1426.
52. Xu XY, McGrath SP, Meharg AA, et al. Growing rice aerobically decreases arsenic accumulation. Environmental Science and Technology 2008;42: 5574-5579.
53. Rinklebe J, Shaheen SM, Yu K. Release of As, Ba, Cd, Cu, Pb, and Sr under predefinite redox conditions in different rice paddy soils originating from the USA and Asia. Geoderma 2016;270: 21-32.
54. Bakhat HF, Zia Z, Fahad S, et al. Arsenic uptake, accumulation, and toxicity in rice plants: possible remedies for its detoxification: a review. Environmental Science and Pollution Research 2017;24(10): 9142-9158.
55. Matsumoto S, Kasuga J, Makino T, et al. Evaluation of the effects of application of iron materials on the accumulation and speciation of arsenic in rice grain grown on uncontaminated soil with relatively high levels of arsenic. Environmental and Experimental Botany 2016;125: 42-51.
56. Liu C, Yu HY, Liu C, et al. Arsenic availability in rice from a mining area: Is amorphous iron oxide-bound arsenic a source or sink. Environmental Pollution 2015;199: 95-101.
57. Farrow EM, Wang J, Burken JG, et al. Reducing arsenic accumulation in rice grain through iron oxide amendment. Ecotoxicology and Environmental Safety 2015;118: 55-61.
58. Qiao JT, Liu TX, Wang XQ, et al. Simultaneous alleviation of cadmium and arsenic accumulation in rice by applying zero-valent iron and biochar to contaminated paddy soils. Chemosphere 2018;195: 260-271.
59. Sanglard LM, Detmann KC, Martins SC, et al. The role of silicon in metabolic acclimation of rice plants challenged with arsenic. Environmental and Experimental Botany 2016;123: 22-36.
60. Meharg C, Meharg AA. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality in rice Environmental and Experimental Botany 2015;120: 8-17.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

61. Limmer MA, Wise P, Dykes GE, et al. Silicon decreases dimethylarsinic acid concentration in rice grain and mitigates straighthead disorder. Environmental Science and Technology 2018;52(8): 4809-4816.
62. Sun SK, Chen Y, Che J, et al. Decreasing arsenic accumulation in rice by overexpressing OsNIP1;1 and OsNIP3;3 through disrupting arsenite radial transport in roots. New Phytologist 2018;219(2): 641-653.
63. Hussain MM, Bibi I, Niazi NK, et al. Arsenic biogeochemical cycling in paddy soil-rice system: interaction with various factors, amendments and mineral nutrients. Science of The Total Environment 2021;773: 145040.
64. Wang HY, Wen SL, Chen P, et al. Mitigation of cadmium and arsenic in rice grain by applying different silicon fertilizers in contaminated fields. Environmental Science and Pollution Research 2016;23(4): 3781-3788.
65. Li RY, Stroud JL, Ma JF, et al. Mitigation of arsenic accumulation in rice with water management and silicon fertilization. Environmental Science and Technology 2009;43: 3778-3783.
66. Dixit G, Singh AP, Kumar A, et al. Sulfur mediated reduction of arsenic toxicity involves efficient thiol metabolism and the antioxidant defense system in rice. Journal of Hazardous Materials 2015;298: 241-251.
67. Azam SMGG, Sarker TC, Sabrina N. Factors affecting the soil arsenic bioavailability, accumulation in rice and risk to human health: A review. Toxicology Mechanisms and Methods 2016;26: 565-579.
68. Srivastava S, Akkarakaran JJ, Sounderajan S, et al. Arsenic toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) is influenced by sulfur supply: impact on the expression of trans- porters and thiol metabolism. Geoderma 2016;270: 33-42.
69. Finnegan PM, Chen W. Arsenic toxicity: The effects on plant metabolism. Frontiers in Physiology 2012;3: 1-18.
70. Meselhy AG, Sharma S, Guo Z, et al. Nanoscale sulfur improves plant growth and reduces arsenic toxicity and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). Environmental Science and Technology 2021;55: 13490-13503.
71. Hu ZY, Zhu YG, Li M, et al. Sulfur (S)-induced enhancement of iron plaque formation in the rhizosphere reduces arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. Environmental Pollution 2007;147: 387-393.
72. Dixit G, Singh AP, Kumar A, et al. Reduced arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) shoot involves sulfur mediated improved thiol metabolism, antioxidant system and altered arsenic transporters. Plant Physiology and Biochemistry 2016;99: 86-96.
73. Ma X, Geiser-Lee J, Deng Y, et al. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. Science of The Total Environment 2010;408(16): 3053-3061.
74. Reible D, Lampert D, Constant D, et al. Active capping demonstration in the Anacostia River, Washington, DC. The Journal of Environmental Cleanup Costs, Technologies and Techniques 2006;17(1): 39-53.
75. Ma X, Sharifan H, Dou F, et al. Simultaneous reduction of arsenic (As) and cadmium (Cd) accumulation in rice by zinc oxide nanoparticles. Chemical Engineering Journal 2020;384: 1385-8947.
76. Wang X, Sun W, Ma X. Differential impacts of copper oxide nanoparticles and Copper (II) ions on the uptake and accumulation of arsenic in rice (*Oryza sativa* L.). Environmental Pollution 2019;252: 967-273.
77. Wu Q, Shi J, Jiang X, et al. Regulatory Mechanism of Copper Oxide Nanoparticles on Uptake of Different Species of Arsenic in Rice. Nanomaterials, 2021;11: 2228.
78. Liu C, Wei L, Zhang S, et al. Effects of nanoscale silica sol foliar application on arsenic uptake, distribution and oxidative damage defense in rice (*Oryza sativa* L.) under arsenic stress. RSC Advances 2014;4(100): 57227-57234.
79. Wang X, Jiang J, Dou F, et al. Simultaneous mitigation of arsenic and cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by silicon oxide nanoparticles under different water management schemes. Paddy and Water Environment 2021;19: 569-584.
80. Wang X, Sun W, Zhang S, et al. Elucidating the effects of cerium oxide nanoparticles and zinc oxide nanoparticles on arsenic uptake and speciation in rice (*Oryza sativa*) in a hydroponic system. Environmental Science and Technology 2018;52(17): 10040-10047.
81. Liu J, Simms M, Song S, et al. Physiological effects of copper oxide nanoparticles and arsenic on the growth and life cycle of rice (*Oryza sativa japonica* 'Koshihikari'). Environmental Science and Technology 2018;52(23): 13728-13737.
82. Zhou S, Peng L, Lei M, et al. Control of As soil to rice transfer (*Oryza sativa* L.) with nano-manganese dioxide. Acta Scientiae Circumstantiae 2015;35: 855-861.
83. Cui J, Li Y, Jin Q, et al. Silica nanoparticles inhibit arsenic uptake into rice suspension cells via improving pectin synthesis and the mechanical force of the cell wall. Environmental Science: Nano 2020;7(1): 162-171.
84. Li B, Zhou S, Wei D, et al. Mitigating arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) from typical arsenic-contaminated paddy soil of southern China using nanostructured α-MnO2: pot experiment and field application. Science of The Total Environment 2019;650: 546-556.
85. Wu X, Hu J, Wu F, et al. Application of TiO_2 nanoparticles to reduce bioaccumulation of arsenic in rice seedlings *(Oryza sativa* L.): a mechanistic study. Journal of Hazardous Materials 2021;405: 124047.
86. Islam F, Yasmeen T, Riaz M, et al. Proteus mirabilis alleviates zinc toxicity by preventing oxidative stress in maize (*Zea mays*) plants. Ecotoxicology and Environmental Safety 2014;110: 143-152.
87. Shaker Kouhi S, Rabiee M. Strategies of Reducing Cadmium Uptake and Accumulation in Rice Grain: A Review. Journal of Biosafety 2023;16(3): 75-98 [in Persian].
88. Kruger MC, Bertin PN, Heipieper HJ, et al. Bacterial metabolism of environmental arsenic — mechanisms and biotechnological applications. Applied

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]

Microbiology and Biotechnology 2013;97(9): 3827-3841.
89. Yang YP, Zhang HM, Yuan HY, et al. Microbe mediated arsenic release from iron minerals and arsenic methylation in rhizosphere controls arsenic fate in soil-rice system after straw incorporation. Environmental Pollution 2018;236: 598-608.
90. Williams GP, Gnanadesigan M, Ravikumar S. Biosorption and biokinetic properties of Solar Saltern Halobacterial strains for managing Zn^{2+}, As^{2+} and Cd^{2+} metals. Geomicrobiology Journal 2013;30: 497-500.
91. Kumarathilaka P, Seneweera S, Meharg A, et al. Arsenic speciation dynamics in paddy rice soil-water environment: sources, physico-chemical, and biological factors-a review. Water Research 2018;140: 403-414.
92. Li H, Chen XW, Wong MH. Arbuscular mycorrhizal fungi reduced the ratios of inorganic/organic arsenic in rice grains. Chemosphere 2016;145: 224-230.
93. Pathare V, Srivastava S, Sonawane BV, et al. Arsenic stress affects the expression profile of genes of 14–3-3 proteins in the shoot of mycorrhiza colonized rice. Physiology and Molecular Biology of Plants 2016;22(4): 515-522.
94. Moens M, Branco R, Morais PV. Arsenic accumulation by a rhizosphere bacterial strain Ochrobactrum tritici reduces rice plant arsenic levels. World Journal of Microbiology and Biotechnology 2020;36(2): 23.
95. Norton GJ, Islam MR, Deacon CM, et al. Identifi cation of low inorganic and total grain arsenic rice cultivars from Bangladesh. Environmental Science and Technology 2009;43: 6070-6075.
96. Pillai TR, Yan WG, Agrama HA, et al. Total grain-arsenic and arsenic-species concentrations in diverse rice cultivars under flooded conditions. Crop Science 2010;50: 2065-2075.
97. Norton G, Duan GL, Lei M, et al. Identification of quantitative trait loci for rice grain element composition on an arsenic impacted soil: Influence of flowering time on genetic loci. Annals of Applied Biology 2012;161(1): 46-56.
98. Samal AC, Bhattacharya P, Biswas P, et al. Variety-specific arsenic accumulation in 44 different rice cultivars (*O. sativa* L.) and human health risks due to co-exposure of arsenic-contaminated rice and drinking water. Journal of Hazardous Materials 2021;407: 124804.
99. Zhang J, Zhu YG, Zeng DL, et al. Mapping quantitative trait loci associated with arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa*). New Phytologist 2008;177: 350-356.
100. Syed MA, Iftekharuddaula K, Mian MK, et al. Main effect QTLs associated with arsenic phyto-toxicity tolerance at seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.). Euphytica 2016;209(3): 805-814.
101. Suriyagoda LDB, Dittert K, Lambers H. Arsenic in rice soils and potential agronomic mitigation strategies to reduce arsenic bioavailability: a review. Pedosphere 2018;28(3): 363-382.
102. Moulick D, Santra SC, Ghosh D. Effect of selenium induced seed priming on arsenic accumulation in rice plant and subsequent transmission in human food chain. Ecotoxicology and Environmental Safety 2018;152: 67-77.
103. Zhao FJ, Wang P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies. Plant and Soil 2020;446(1): 1-21.
104. Gorny J, Billon G, Lesven L, et al. Arsenic behavior in river sediments under redox gradient: a review. Science of the Total Environment 2015;505: 423-434.
105. Rahaman S, Sinha AC, Mukhopadhyay D. Effect of water regimes and organic matters on transport of arsenic in summer rice *(Oryza sativa* L.). Journal of Environmental Sciences 2011;23: 633-639.
106. Fu Y, Chen M, Bi X, et al. Occurrence of arsenic in brown rice and its relationship to soil properties from Hainan Island, China. Environmental Pollution 2011;159: 1757-1762.
107. Shrivastava A, Barla A, Majumdar A, et al. Arsenic mitigation in rice grain loading via alternative irrigation by proposed water management practices. Chemosphere 2020;238: 124988.
108. Kumarathilaka P, Seneweera S, Ok YS, et al. Mitigation of arsenic accumulation in rice: an agronomical, physico-chemical, and biological approach–a critical review. Crit. Rev. Environmental Science and Technology 2020;50(1): 31-71.
109. Devi OR, Laishram B, Debnath A, et al. Mitigation of arsenic toxicity in rice grain through soil-water-plant continuum. Plant, Soil and Environment 2024;70(7): 395-406.
110. Mei XQ, Ye ZH, Wong MH. The relationship of root porosity and radial oxygen loss on arsenic tolerance and uptake in rice grains and straw. Environmental Pollution 2009;157: 2550-2557.
111. Wu C, Ye ZH, Shu WS, et al. Arsenic accumulation and speciation in rice are affected by root aeration and variation of genotypes. Journal of Experimental Botany 2011;62(8): 2889-2898.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-17]