Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Effect of Zinc application on Arsenic Dynamics in Contaminated Soil and Agronomic traits of Three Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars

Tayebeh Shoja[1], Ali Ebadi✉[2], Masoud Esfahani[3], Shahram Mahmoudsoltani[4]

1. Department of Agriculture and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. Email: tayebeh.shoja@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Agriculture and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. Email: ebadi_ali2000@yahoo.com
3. Department of Agriculture and Plant Breeding, Faculty of Agriculture Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: mesfahan@yahoo.com
4. Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. Email: shmsoltani@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 19, 2022

Received: May. 27, 2022

Accepted: June. 6, 2022

Published online: July. 23, 2022

Keywords:
Micronutrients,
Heavy Elements,
Rice,
Yield and Yield Components

ABSTRACT

Arsenic as aheavy metal, is one of the most important pollutant in the environment that has a detrimental effect on the morphological, physiological and biochemical properties of rice. Zinc application is one of the way to reduce negative effects of arsenic. For this purpose, an outdoor experiment was performed in the form of three-factor factorial experiment based on complete randomized design with three replications at the Rice Research Institute of Iran (Rasht) during growing season in 2019. The proposed factors were zinc at three levels (0, 10 and 20 mgkg-1) as zinc sulfate, arsenic at three levels (0, 1 and 2 mg kg-1) as Arsenic oxide, and three rice cultivars (Hashemi, Gilaneh, Ghodsi). The results indicated that all factors had significant effect on the amount of zinc uptake in the soil, straw and grain, amount of arsenic in the soil, straw and grain, plant height, total and fertile tiller number, panicle length, 1000-seed weight, biomass and grain yield. The uppermost increase in plant height, total tiller number, fertile tillers, panicle length, 1000-seed weight and grain yield were recorded 1.5, 68.4, 85.05, 31.5, 6.6 and 58.5 percent, respectively due to soil application of 20 mg zinc per kg-1. In terms of zinc uptake by straw and grain, Hashemi cultivar> Ghodsi cultivar> Gilaneh cultivar showed the highest zinc content, respectively, which Hashemi and Ghodsi cultivars are more efficient in terms of zinc uptake and are more tolerant to arsenic. The highest amount of arsenic in straw and grain was observed in Gilaneh> Ghodsi> Hashemi cultivars, respectively. Therefore, due to the interaction of zinc with arsenic, the use of zinc and cultivars with high zinc uptake capacity might be a good way to reduce arsenic toxicity in rice plants.

Cite this article: Shoja, T., Ebadi, A., Esfahani, M., & Mahmoudsoltani, Sh. (2022) Effect of Zinc application on Arsenic Dynamics in Contaminated Soil and Agronomic traits of Three Rice (Oryza sativa L.) Cultivars. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5), 1145-1161.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.341841.669248

Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

اثر مصرف روی بر دینامیک آرسنیک در خاک‌های آلوده و ویژگی‌های زراعی سه رقم برنج (*Oryzasativa* L.)

طیبه شجاع[1]، علی عبادی[2]✉، مسعود اصفهانی[3]، شهرام محمود سلطانی[4]

۱. گروه زراعت واصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ایمیل: tayebeh.shoja@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ایمیل: ebadi_ali2000@yahoo.com

۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، ایمیل: mesfahan@yahoo.com

۴. موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران. ایمیل: shmsoltani@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۳۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۵/۱

واژه‌های کلیدی:
برنج،
عملکرد و اجزای عملکرد،
عناصر کم‌مصرف و
عناصرسنگین

چکیده

آرسنیک یکی از مهمترین عناصر سنگین آلوده کننده محیط زیست بوده که ثاثیر زیان‌باری بر ویژگی‌های مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه برنج دارد. یکی از راه‌های کاهش اثر سوء آرسنیک استفاده از عنصر روی می‌باشد. به این منظور آزمایش گلدانی در فضای آزاد به صورت فاکتوریل سه عاملی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در بهار سال۱۳۹۸در موسسه تحقیقات برنج کشور (رشت) انجام شد. عامل‌های مورد مطالعه شامل عنصر روی در سه سطح (صفر،۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی ۲۲ درصد)، عنصر آرسنیک در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع اکسید آرسنیک)و ارقام برنج در سه سطح شامل (هاشمی، گیلانه و قدسی) بودند. نتایج نشان داد که تمامی عامل‌ها بر بسیاری از شاخص‌ها و صفت‌های اندازه‌گیری شده مانند محتوای روی در خاک، محتوای روی در کاه وکلش و دانه، محتوای آرسنیک در خاک، محتوای آرسنیک در کاه وکلش و دانه، ارتفاع بوته، تعداد پنجه کل، تعداد پنجه بارور، طول خوشه، وزن هزاردانه و عملکرد دانه تاثیر معنی‌داری داشتند. بیشترین مقدار افزایش ارتفاع بوته، تعداد پنجه کل، پنجه بارور، طول خوشه، وزن هزاردانه و عملکرد دانه به ترتیب ۱/۵، ۶۸/۴، ۸۵/۰۵، ۳۱/۵، ۶/۶ و ۵۸/۵ درصد ناشی از مصرف خاکی ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی و بدون کاربرد آرسنیک به ثبت رسید. از نظر محتوای روی در کاه و کلش و دانه، رقم هاشمی>رقم قدسی>رقم گیلانه به ترتیب بالاترین میزان روی را نشان دادند که رقم هاشمی و قدسی از نظر جذب روی کارآمدتر محسوب می‌شوند و برای مقابله با آرسنیک متحمل‌تر هستند و بیشترین میزان آرسنیک در کاه وکلش و دانه به ترتیب در ارقام گیلانه >قدسی> هاشمی مشاهده شد. بنابراین با توجه به اثر متقابل روی با آرسنیک، استفاده از عنصر روی و ارقامی با توانایی جذب روی بالا می‌تواند روشی مناسب برای کاهش سمیت آرسنیک در گیاه برنج باشد.

استناد: شجاع، طیبه؛ عبادی، علی؛ اصفهانی، مسعود؛ محمودسلطانی، شهرام (۱۴۰۱). اثر مصرف روی بر دینامیک آرسنیک در خاک‌های آلوده و ویژگی‌های زراعی سه رقم برنج (Oryzasativa L.). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۵)، ۱۱۶۱-۱۱۴۵.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.341841.669248

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

برنج غذای اصلی نیمی از مردم جهان را که بیشتر در کشورهای در حال توسعه زندگی می‌کنند، تشکیل داده و ۷۰ درصد ازانرژی و ۵۰ درصد از پروتئین مورد نیاز ساکنان مناطق برنج‌خیز در این کشورها را تامین می‌کند (FAO., 2020; Niazi et al., 2022).مسمومیت با آرسنیک یک موضوع نوظهور بوده و مدیریت آن یک موضوع عمده در سطح جهانی بهداشت عمومی محسوب می‌شود. مسمومیت با آرسنیک هم روی سلول‌های گیاهی و هم بر سلول‌های جانوری اثر مضر دارد. آرسنیکبه عنوان یک عنصر سرطان‌زای قوی گزارش شده که می‌تواند باعث ایجاد سرطان در اندام‌های مختلف بدن انسان شود(Mawia et al., 2021).آرسنیک یکی از مهم‌ترین عناصر سنگین آلوده کننده محیط زیست بوده که ثاثیر زیان‌باری بر ویژگی‌های مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی برنج، به ویژه در نقاطی که آبهای زیرزمینی آنها حاوی مقدار معتنابهی آرسنیک است، دارد (Rahman et al., 2006; Mawia et al., 2021; Khan et al., 2022). برنج نسبت به سایر دانه‌های غلات اصلی تشکیل دهنده رژیم غذایی، حاوی حدود ده برابر غلظت آرسنیک بیشتر است (Williams et al., 2007;Moulick et al., 2021).

غلظت آرسنیک در دانه برنج بستگی به فراهمی زیستی این عنصر در خاک، ژنوتیپ برنج و شرایط رشد گیاه دارد. پتانسیل اکسیداسیون- احیا (ردوکس) در خاک برنج تأثیر عمیق اما معکوس بر فراهمی زیستی آرسنیکدارد.از دو روش می‌توان برای کاهش تجمع آرسنیک در دانه برنج استفاده کرد: کاهش فراهمی زیستی آرسنیک در خاک یاکاهش جذب/انتقال آرسنیک به دانه (Srivastava et al., 2021; Hussain et al., 2021).یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بیوژئوشیمیایی خاک‌های شالیزاری، غالب بودن شرایط بی‌هوازی پس از غرقاب کردن مزرعه است که باعث احیای آرسنات (AsO_4^{3-})به آرسنیت (AsO_2) می‌شود، در شرایط غرقابی، آرسنیت فرم غالب آرسنیک در محلول خاکی است (Stroud et al., 2011;Panaullah et al., 2009;Guo et al., 2008;Srivastava et al., 2021; Hussain et al., 2021; Khan et al., 2022) و از این رو، جذب آن به وسیله گیاه برنج از اهمیت زیادی برخوردار است. آرسنیک معدنی باعث افزایش طیف گسترده‌ای از سرطان‌ها در انسان می‌شود که شایع‌ترین آنها سرطان مثانه، ریه و پوست می‌باشند. تماس درازمدت انسان با انواع معدنی آرسنیک نیز منجر به طیف وسیعی از سایر اثرات منفی بهداشتی مانند افزایش فشار خون، ابتلا به دیابت و تولد زودرس کودکان می‌گردد (Srivastava et al., 2021; Hussain et al., 2021Mawia et al., 2021). آلودگی آب‌های زیرزمینی با آرسنیک در برخی کشورهای آسیایی که از این آبها برای آبیاری مزارع برنج استفاده می‌کنند، شدیدتر بوده و در نتیجه از "آرسنیکوز" رنج می‌برند. آرسنیک در نهایت وارد بدن انسان و حیواناتشده و موجب ناهنجاری‌های مختلف و سرطان زایی می‌شود (Srivastava et al., 2021; Hussain et al., 2021;Khan et al., 2022). در خاک‌های مناطق آلوده سطح آرسنیک تا هفت برابر سطح طبیعی(۴ تا ۸ میلی‌گرم برکیلوگرم) نیز افزایش می‌یابد (Huq and Naidu, 2003;Mawia et al., 2021). آرسنیک توسط ریشه‌های گیاه جذب و سپس از طریق انتقال در آوندهای چوبی در ساقه‌ها و برگ‌ها انباشته می‌شود و در نهایت در دانه‌ها تجمع می‌یابد (Sanchary and Huq, 2017). حد بالای سمیت آرسنیک در خاک،۱۰ میلی‌گرم بر کیلو گرم برای گیاه برنج است (Das et al., 2008; Hussain et al., 2021). در سطح جهان، بسیاری از مردم دچار مسمومیت با آرسنیک می‌شوند. گزارش شده است که قرار گرفتن دوازده رقم برنج در معرض آرسنات (AsV) باعث تاخیر در رشد، تولید بیوپپتیدهای آرسنات-کلاتین و تغییر فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها همراه با افزایش محتوای آسکوربات (AsA) – گلوتاتیون (GSH) (به‌عنوان عوامل محافظتی) شد (Majumder et al., 2022). آزمایشاتی برای کشف سازوکار جذب آرسنیک بوسیله گیاه برنج انجام شده و گزارش شد که آرسنیت بر اثر انتقال فعال به غشای پلاسمایی گیاهان منتقل می‌شود. به نظر می‌رسد که آرسنیک به صورت ترکیبات آرسنیت-تیول (نظیرکمپلکس آرسنیت-فیتوکلاتین: As (III) -PC_3) در واکوئل سلول حبس و انباشته می‌شود (Abedin et al., 2002; Meharg and Jardine., 2003; Zhao et al., 2009; Hussain et al., 2021).

روی (Zn^{+2}) یک عنصر ریزمغذی برای رشد طبیعی گیاهان، حیوانات و انسانها که از طریق گیاهان آن‌را جذب می‌کنند. روی در یکپارچگی غشا، فعالیت آنزیم‌ها، تنظیم و بیان ژن‌ها، متابولیسم کربوهیدرات‌ها، تنفس ریشه، سنتز پروتئین‌ها، یکپارچگی ساختار ریبوزم‌ها، سم‌زدایی رادیکال‌های آزاد، فعالیت فیتوهورمون‌ها و مقاومت در برابر بیماری‌ها نقش دارد (Kim et al., 2002). عنصر روی در تعدادی از فرایندهای فیزیولوژیک رشد گیاه و فرآیندهای سوخت‌وساز آن از جمله فعال سازی حدود ۳۰۰ آنزیم، سنتز پروتئین‌ها، واکنش‌های درگیر در متابولیسم کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها، اکسین و اسیدهای نوکلئیک و تنظیم باروری (تشکیل دانه‌های گرده) دخالت دارد(Gao et al., 2011).

آنزیم‌های گیاهی که توسط روی فعال می‌شوند عمدتاً در متابولیسم قندها، حفظ یکپارچگی ساختار غشای سلولی، سنتز پروتئین، تنظیم سنتز هورمون اکسین و تشکیل دانه گرده دخیل هستند (Alloway, 2008; Ma et al., 2020;Mousavi, 2012).

در سال‌های گذشته روش‌های مختلف زراعی برای کاهش تجمع آرسنیک در گیاه برنج که شامل بارورسازی خاک با عناصر معدنی، مدیریت آب و شیوه‌های آبیاری، استراتژی زیست‌پالاییبه کار گرفته شده است (Mawia et al., 2021). فسفات به دلیل تبادل با آرسنات یا آرسنیت جذب شده روی ذرات جامد خاک یا رسوب آهن در سطح ریشه، باعث افزایش آرسنیک قابل دسترس برای گیاه برنج می‌شود، این تأثیر با احیای آرسنات به آرسنیت در محلول خاک و جذب آرسنیت از طریق مسیرهای انتقال غیرفسفاتی به ریشه برنج، شدت می‌گیرد (Deng et al., 2010; Wu et al., 2011; Faizan et al., 2021) و همانطور که روی و فسفر رابطه آنتاگونیستی با هم دارند، انتظار می‌رود که روی باعث کاهش غلظت آرسنیک موجود در خاک و گیاهان شود (Sanchary and Huq, 2017).یکی از دلایل کاهش آرسنیک در حضور روی را می‌توان به تثبیت آرسنیک به صورت آرسنات روی (Zn-arsenate) نسبت داد [$Arsenate + ZnCl_2 \rightarrow Zn - arsenates$] که به دلیل تحرک کم، برای گیاهان غیرقابل دسترس است(Craw and Chappell, 2000; ma et al., 2020). در اثر استفاده از نانوذرات روی بر بذر برنج در شرایط تنش آرسنیک مشخص شد که روی به صورت نانو ذره اکسید روی باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی (۲/۳ تا ۹/۹ درصد)، وزن ساقه (۱۸/۲ تا ۴۲/۴ درصد)، وزن ریشه (۵/۲ تا ۲۳/۹ درصد)، محتوای کلروفیل (۳/۵ تا ۴۰/۱ درصد) و افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (۲/۲ تا ۲۲/۸ درصد)، کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید (۱۷/۵ تا ۳۰/۸ درصد) شده و تجمع آرسنیک در ریشه و ساقه به ترتیب۸/۴ تا ۷۲/۳ درصد و ۱۰/۲ تا ۵۶/۶ درصد کاهش نشان داد. به عبارت دیگر فراهمی روی بر مقاومت برنج نسبت به سمیت آرسنیک (با افزایش جوانه‌زنی، تولید زیست‌توده بیشتر و جذب روی و کاهش جذب آرسنیک) موثر بوده است (Wu et al., 2020).

در یک تحقیق که با هدف ارزیابی اولیه از محتوای روی در دانه برنج در منطقه‌ای با سطوح بالای آرسنیک در کامبوج انجام گرفت، بین آرسنیک و روی در گیاه برنج همبستگی منفی معنی‌دار گزارش شدو کمترین میزان روی در نزدیکی چاه‌های آبیاری آلوده به آرسنیک مشاهده شد. محتوای روی در برنج مزارعی که در آنها کود گاوی مصرف شده بودند، به‌طور قابل‌توجهی بیشتر بود (Murphy., 2019).در آزمایشی که به استفاده نانوذرات اکسید روی و یون روی در گیاه برنج پرداخته شد، کاهش آرسنیک کل در ریشه برنج (۳۹/۵ تا ۸۳/۳ درصد) و ساقه (۶۰/۲ تا ۸۰ درصد) گزارش شد(Ma et al., 2020). در یک تحقیق آزمایشگاهی که به منظور بررسی اثر روی و مواد آلی بر تحرک آرسنیک در خاک انجام شد، غلظت‌های آرسنیک صفر، ۵ و ۱۰ وغلظت‌های روی صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نظر گرفته شدند.با توجه به برهمکنش بین روی و آرسنیک، مشاهده شد که در تیمارهای روی، محتوای آرسنیک خاک کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که روی در کاهش غلظت آرسنیک خاک اثر قابل توجهی دارد. سمیت آرسنیک ممکن است با استفاده از سولفات روی، آهن و آلومینیوم در خاک کاهش یابد. چنین کاهشی در غلظت آرسنیک ممکن است به دلیل اثر سرکوب‌کنندگی روی باشد که منجر به رسوب/تثبیت آرسنیک به‌عنوان آرسنات رویشده و آن را از دسترس گیاهان خارج می‌کند (Das et al., 2005 and 2008). آزمایشاتی به منظور ارزیابی اثر آب آبیاری حاوی آرسنیک، روی و مواد آلی بر انتقال آرسنیک در گیاه برنج انجام شده است، نشان داده است که میزان آرسنیک قابل جذب با مصرف روی، کاهش یافته و مقدار این کاهش بسته به مقادیر روی متفاوت بود. با مصرف مواد آلی نیز محتوای آرسنیک خاک کاهش نشان داد. با توجه به رابطه آنتاگونیستی بین روی و آرسنیک، می‌توان از مصرف روی به‌عنوان راهکاری برای کاهش سمیت آرسنیک در خاک‌های آلوده استفاده کرد(Sanchary and Huq., 2017).

از آنجائیکه نتایج آزمایشات مربوط به اثر بخشی عنصر روی بر آرسنیک چندان قطعیت نداشته و همچنین مطالعات چندانی از تاثیر متقابل آرسنیک و روی بر ارقام محلی و اصلاح شده کشور انجام نشده است، بدین منظور آزمایشی به منظور بررسی تاثیر کاربرد عنصر روی به همراه استفاده از ارقامی با توانایی جذب روی بالا برای کاهش اثرات منفی سمیت آرسنیک در خاک و گیاه برنج طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت گلدانی در هوای آزاد در بهار سال۱۳۹۸ در مزرعه پژوهشی موسسه تحقیقات برنج کشور، رشت انجام شد. محل آزمایش دارای عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی و ارتفاع منفی هفت متر از سطح دریا بود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

بافت خاک	رس	سیلت	شن	آرسنیک قابل جذب	روی قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	نیتروژن	کربن آلی	اسیدیته کل اشباعpH	قابلیت هدایت الکتریکی
	درصد			میلی‌گرم بر کیلوگرم				درصد			دسی‌زیمنس بر متر
رسی	۵۴	۲۸	۱۸	۰	۲/۶	۱۹۸	۱۰	۰/۱۳	۱/۴	۷/۱۱	۰/۴۵

این آزمایش سه عاملی به صورت فاکتوریل درقالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرارانجام شد. عامل‌های آزمایش شامل عنصر روی در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، عنصر آرسنیک در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و ارقام در سه سطح شامل (هاشمی، گیلانه وقدسی) بودند. بذر ارقام برنج از موسسه تحقیقات برنج کشور دریافت شدند (جدول ۲)

جدول ۲. ویژگی‌های ژنوتیپ‌های برنج‌های مورد ارزیابی

ارقام برنج	والد پدری	والد مادری	منشاء
هاشمی	رقم محلی		ایران
گیلانه	آبجی بوجی	آبجی بوجی×صالح	ایران
قدسی	موتانت طارم محلی		ایران

خاک مزرعه هوا خشک، خُرد شده و پس از عبور از الک دو میلی متری به مقدار ۲۰ کیلوگرم در گلدان‌های پلاستیکی با حجم ۳۰ لیتر ریخته شد. تعداد گلدان‌ها در هر تکرار ۲۷ عدد بود. طبق روش‌های توصیه شده توسط موسسه تحقیقات برنج کشور درکلیه گلدان‌ها به صورت یکسان، کودپتاسیم معادل۱۰۰ کیلوگرم اکسید پتاسیم (K_2O) در هکتار از منبع سولفات پتاسیم (۵۰ میلی‌گرم برکیلوگرم خاک) و کود فسفر نیز معادل ۴۵ کیلوگرم در هکتار پنتااکسیدفسفر (P_2O_5) از منبع سوپرفسفات‌تریپل (۲۲/۵ میلی‌گرم برکیلوگرم خاک) پیش از نشاکاری به خاک گلدان‌هاافزوده و به خوبی مخلوط گردیدند. کودنیتروژن نیز معادل۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار از منبع اوره (۳۰ میلی‌گرم برکیلوگرم خاک) و در سه مرحله پیش از نشاکاری، در مرحله وجین و در مرحله برجستگی دوگانه به خاک کلیه گلدان‌ها افزوده شد. کود روی در سه سطح (صفر،۱۰، ۲۰میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) از منبع سولفات روی ۲۲ درصدبه مقدار (صفر، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم برحسب مورد در هر گلدان)و عنصر آرسنیک در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از منبع اکسید آرسنیک(AS_2O_3) به مقدار (صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم) پیش از نشاکاری بر حسب مورد،به گلدان‌ها افزوده شدند. پس از غرقاب نمودن و گِلخراب(مخلوط)کردن خاک‌های گلدان‌ها و قراردادن آب به ارتفاع پنج سانتی‌متر از سطح خاک، نشاکاری در هر گلدان به تعدادسه گیاهچه‌درکپهبرای هر سه رقم برنج انجام شد. تیمارهای آزمایش عبارت بودند از: V_1(رقم هاشمی)،V_2(رقم گیلانه) V_3(رقم قدسی)،Z_0(بدون مصرف کود روی)، Z_1(۱۰ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک گلدان)، Z_2(۲۰ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک گلدان)، A_0(بدون مصرف آرسنیک)، A_1(یک میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک گلدان)، A_2(دو میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک گلدان). کلیه عملیات داشت مانند مبارزه با آفات، بیماری‌ها، وجین و آبیاری طبق روش‌های توصیه شده توسط موسسه تحقیقات برنج کشور در کلیه گلدان‌ها به صورت یکسان اعمال شد. در هنگام برداشت، خصوصیات مورفولوژیکی مانند ارتفاع بوته (فاصله بین سطح خاک تا انتهای خوشه اصلی بدون احتساب ریشک در ساقه اصلی)، پنج بوته در هر گلدان در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه به طور تصادفی انتخاب و با استفاده از خط‌کش، بر حسب واحد سانتی‌متر اندازه‌گیری شدند)، تعداد پنجه کل و بارور (برای تعیین این صفات در زمان رسیدگی فیزیولوژیک، تعداد پنجه‌های کل و موثر (پنجه‌هایی که در عملکرد نهایی تاثیر دارند) در هر گلدان شمارش و میانگین تعداد پنجه‌های کل و موثر محاسبه شدند)، درصد باروری پنجه(با تقسیم تعداد پنجه بارور به پنجه کل محاسبه و بر حسب درصد بیان می‌شود).طول خوشه(در مرحله رسیدگی دانه پیش از برداشت، فاصله بین گره گردن خوشه تا نوک بالانرین دانه روی خوشه بدون در نظر گرفتن ریشک در خوشه‌های مربوط به ساقه اصلی در پنج خوشه اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها برای تجزیه آماری استفاده شد)، وزن هزار دانه (گرم با رطوبت ۱۳ درصد. برای تعیین وزن هزار دانه، قبل از برداشت محصول در زمان رسیدگی کامل از هر گلدان ۱۰ خوشه به طور تصادفی انتخاب و از بین دانه‌های سالم صفات مورد نظر اندازه‌گیری شد)، عملکرد دانه(گرم در هر گلدان با رطوبت ۱۴ درصد. پس از رسیدن محصول برای تعیین عملکرد دانه، از هر گلدان تمام محصول، خرمن کوبی و سپس بوجاری شد و در

نهایت با رطوبت ۱۴ درصد مقدار دانه در هر گلدان به طور جداگانه توزین و محاسبه گردید).

میزان آرسنیک و روی قابل جذب در خاک و اندام‌های هوایی (کاه و کلش و دانه)به روش هضم با اسید نیتریک و اسیدپرکلریک عصاره‌گیری(Williams et al., 2005; Li et al., 2009;Xu et al., 2008) و محتوای آرسنیک و روی در نمونه‌های خاک، کاه و دانه با دستگاه اسپکترومتری انتشار نوری ICP-OES(Inductively- coupled plasma- Optical Emission Spectroscopy) در دانشکده بهداشت دانشگاه گیلان قرائت شد. (اسپکترومتری نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) یکی از مهم‌ترین روش‌های دستگاهی آنالیز عنصری است، اساس این روش برانگیختگی الکترون‌های عناصر مختلف در محیطی به نام پلاسما و نشر نور بعد از حالت آسایش الکترونی است و به دلیل تطبیق‌پذیری و تکرارپذیری، می‌توان نتایجی با دقت و صحت بالا به دست آورد). پس از اندازه‌گیری و گردآوری داده‌ها ابتدا از آزمون آماری کولموگرف اسمیرونوف برای اطمینان از نرمال بودن داده‌ها استفاده شد. کلیه تجزیه های آماری شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین به روش توکی با استفاده از نرم افزارهای SAS 9.2 انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که ارتفاع بوته فقط تحت تاثیر اثرات ساده رقم، روی و آرسنیک قرار گرفت($p\leq$۰/۰۱ ، جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده رقم بر این صفت نشان داد که بیشترینارتفاع بوته در رقم هاشمی (۱۴۲/۸سانتی‌متر) بوده که نسبت به رقم گیلانه (۱۰۹/۸ سانتی‌متر)، ۳۰/۱ درصد افزایش را نشان داد(جدول ۴). همچنین بررسی تاثیر کود روی نیز حاکی از آن است که با افزایش سطوح روی میزان ارتفاع افزایش پیدا کرد و مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک (۱۳۲سانتی‌متر) نسبت به عدم مصرف روی (۱۳۰/۱ سانتی‌متر) باعث افزایش ۱/۵ درصدی در ارتفاع بوته شد. با افزایش سطوح آرسنیک میزان ارتفاع بوته کاهش یافت بطوریکه میزان ارتفاع بوته در عدم مصرف آرسنیک (۱۳۰/۷ سانتی‌متر) نسبت به مصرف دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک (۱۲۸/۳ سانتی‌متر)، ۱/۹ درصد افزایش را در این صفت نشان داد (جدول ۴).

(**Shivay *et al*., 2008**) بر این نکته تاکید داشتند که سولفات روی با ایجاد شرایط اسیدی‌تر، موجب جذب بهتر روی در گیاه می‌شود و در نتیجه منجر به بهبود شرایط رشد و نموی گیاه برنج می‌شوند. محققان اظهار داشتند که افزایش ارتفاع گیاه در نتیجه افزایش تقسیم و طویل‌شدگی سلول در اثر کاربرد روی می‌باشد، علاوه بر آن روی، یکی ازفاکتورهای مهم تاثیرگذار در فعالیت آنزیم تریپتوفان سینتتاز می‌باشد و با توجه به اینکه اسید آمینه تریپتوفان به عنوان پیش ماده تولید اکسین عمل می‌کند، لذا با افزایش تولید اکسین، تشدید چیرگی راسی و متعاقب آن افزایش رشد طولی ساقه و شاخساره‌ها دور از انتظار نخواهد بود (**Mahmoudsoltani, 2018**). (**Yan et al 2021**) نشان دادند که افزودن روی به شکل نانوذره اکسیدروی، رشد و فتوسنتز گیاهچه برنج را افزایش وغلظت آرسنیک رادراندام‌های هوایی و ریشه (به‌ترتیب ۴۰/۷ و ۳۱/۶ درصد نسبت به شاهد) کاهش داد.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک، عملکرد دانه ارقام برنج، محتوای روی و آرسنیک گیاه و خاک در تیمارهای روی و آرسنیک

		میانگین مربعات						
منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع بوته	تعداد کل پنجه	تعداد پنجه بارور	درصد باروری پنجه	طول خوشه	وزن هزاردانه	عملکرد دانه
ارقام برنج	۲	۸۵۶۳/۰۲**	۴۷۱/۱۶**	۲۵۴/۲۷**	۶۷/۶۳**	۱۴۵/۲۸**	۰/۲۸**	۵۲۲۴/۲۹**
روی	۲	۸۹/۷۶**	۱/۹۰**	۲۹/۰۸۷**	۷۹۳/۴۵**	۱۳/۹۹**	۱۲/۶۱**	۹۰/۴۵**
آرسنیک	۲	۹/۹۷**	۱۷/۳۵**	۳/۳**	۷۵/۱۸**	۲/۰۷**	۱/۱۰**	۹۲۵/۱۴**
ارقام ×روی	۴	۳/۰۰۶ ns	۰/۱۷**	۰/۱۵**	۱۲/۶۲**	۰/۳۹**	۰/۱۱*	۲۳/۹۷**
روی×آرسنیک	۴	۰/۰۳۱ ns	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۲ns	۰/۴۹ ns	۰/۱۱**	۰/۲۳**	۱۳/۲۰**
ارقام×آرسنیک	۴	۰/۲۹ ns	۱/۴۰**	۰/۰۳ ns	۲۷/۴۴**	۰/۱۳**	۰/۱۱*	۲۳/۶۳**
ارقام×روی×آرسنیک	۸	۰/۱۳ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۱ns	۰/۶۹ ns	۰/۱۴**	۰/۰۸ ns	۲۱/۲۸**
خطای آزمایش	۵۴	۱/۱۹	۰/۰۰۳	۰/۰۲	۰/۸۲	۰/۰۱	۰/۰۴	۱/۲۸
ضریب تغییرات (٪)		۰/۸۳	۲/۳۸	۱/۱۷	۱/۱۴	۰/۴	۰/۸۹	۱/۱۸

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ادامه جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک، عملکرد دانه ارقام برنج، محتوای روی و آرسنیک گیاه و خاک در تیمارهای روی و آرسنیک

		میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای روی در خاک	محتوای روی در کاه و کلش	محتوای روی در دانه	محتوای آرسنیک در خاک	محتوای آرسنیک در کاه و کلش	محتوای آرسنیک در دانه
ارقام برنج	۲	۸۵/۸۹**	۰/۱۴×۱۰$^{-۳}$**	۰/۰۳×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۰۱×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۱۷×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۳۸×۱۰$^{-۳}$ns
روی	۲	۱۱۲۵۶/۰۲**	۷/۶۹×۱۰$^{-۳}$**	۸/۴۶×۱۰$^{-۳}$**	۰/۰۸×۱۰$^{-۳}$**	۰/۲۱×۱۰$^{-۳}$**	۰/۰۰۱×۱۰$^{-۳}$**
آرسنیک	۲	۷۴۱/۴۵**	۰/۵۶×۱۰$^{-۳}$**	۰/۱۶×۱۰$^{-۳}$**	۱۰/۴۰×۱۰$^{-۳}$**	۴/۹۴×۱۰$^{-۳}$**	۰/۰۰۴×۱۰$^{-۳}$**
ارقام ×روی	۴	۲۹/۱۵**	۰/۰۱×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۰۴×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۰×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۰۶×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۳×۱۰$^{-۳}$*
روی×آرسنیک	۴	۲۶۰/۰۴**	۰/۰۵×۱۰$^{-۳}$**	۰/۰۵×۱۰$^{-۳}$**	۰/۰۱۲×۱۰$^{-۳}$**	۰/۰۴۸×۱۰$^{-۳}$*	۰/۰۰۱×۱۰$^{-۳}$**
ارقام×آرسنیک	۴	۸/۱۰ns	۰/۰۰۲×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۰۱×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۰۱×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۱×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۳۵×۱۰$^{-۳}$ns
ارقام×روی×آرسنیک	۸	۱۱/۴۱ns	۰/۰۰۵×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۰۲×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۰×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۰۴×۱۰$^{-۳}$ns	۰/۰۲۹×۱۰$^{-۳}$ns
خطای آزمایش	۵۴	۷/۳۰	۰/۰۱۹×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۱×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۰۵×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۱۲×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۰۱×۱۰$^{-۳}$
ضریب تغییرات (٪)		۱۳/۴۴	۱۲/۲۱	۱۹/۳۰	۱۰/۳۲	۲۵/۴۰	۶/۲۲

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

جدول ٤. مقایسه میانگین صفات مورفولوژیک و محتوای روی کاه و کلش ارقام برنج در تیمارهای روی و آرسنیک

		ارتفاع بوته (سانتی متر)	تعداد بنجه بارور در بوته	محتوای روی در کاه و کلش (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
ارقام برنج	هاشمی	۱۴۲/۸ a		۲۳/۵×۱۰$^{-۳}$a
	گیلانه	۱۰۹/۸ c		۱۸/۵ ×۱۰$^{-۳}$b
	قدسی	۱۳۷/۸ b		۲۰/۴ ×۱۰$^{-۳}$ab
روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)	صفر	۱۳۰/۱b		
	۱۰	۱۳۰/۲ab		
	۲۰	۱۳۲ a		
آرسنیک (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)	صفر	۱۳۰/۷ a	۱۲/۹ a	
	۱	۱۲۹/۵ b	۱۲/۶ b	
	۲	۱۲۸/۳ c	۱۲/۲ c	

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌دار ندارند.

تعداد پنجه کل در بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد علاوه برمعنی‌داری اثرات ساده رقم، روی و آرسنیک، برهمکنش رقم×روی ($p\leq$۰/۰۱) و برهمکنش رقم×آرسنیک ($p\leq$۰/۰۱) بر تعداد پنجه کل در بوته تاثیر معنی‌داری داشت (جدول۳). مقایسه میانگین برهمکنشرقم×آرسنیک نشان داد که بیشترین میزان افزایش پنجه در رقم گیلانه بدون مصرف آرسنیک (۲۱/۵ عدد) بوده که نسبت به رقم هاشمی با مصرف دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک (۱۲/۱ عدد)، ۷۷/۰۵ درصد افزایش را در تعداد پنجه کل نشان داد (جدول۵).مقایسه میانگین برهمکنش رقم×روی نشان داد که بیشترین میزان افزایش تعداد پنجه در رقم گیلانه با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک بوده که نسبت به رقم هاشمی بدون مصرف روی ۶۸/۴ درصد افزایش داشت (جدول ۶). ظرفیت پنجه‌زنی یکی از مهم‌ترین اجزای عملکرد برای افزایش عملکرد دانه به شمار می‌آید (Yoshida, 1983; Mahmoudsoltani and Allagholipour., 2021). در یک آزمایش گزارش شد که تعداد پنجه در برنج با افزایش عنصر روی در خاک بیشتر می‌شود (Mahmoudsoltani *et al*., 2017). نتایج تحقیقات نشان داده است که کاربرد روی به میزان ۱۵ کیلوگرم در هکتار به شکل سولفات روی موجب افزایش معنی‌دار تعداد پنجه در ارقام محلی و اصلاح‌شده برنج شد (Mahmoudsoltaniet al., 2016 and 2017). بر اساس نتایج این پژوهش مصرف روی به طور موثری توانسته است منجر به افزایش تعداد پنجه کل شود، سولفات روی به علت حلالیت بیشتر و تولید محیط اسیدی‌تر باعث بهبود خصوصیات مورفولوژیکی و عملکردی برنج می‌شود، زیرا عنصر روی با

تاثیر بر بسیاری از فرآیندهای بیولوژیکی گیاه مانند متابولیسم اکسین و فعالیت آنزیم‌ها و سنتز نوکلئوتیدها نقش موثری بر تولید پنجه در گیاهان زراعی داشته و بنابراین با افزایش میزان روی قابل جذب خاک، تعداد پنجه در برنج افزایش یافت.

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها با افزایش سطوح آرسنیک تعداد کل پنجه در هر سه رقم برنج کاهش یافت، بیشترین میزان کاهش تعداد پنجه در بوته به دلیل تاثیر منفی آرسنیک ۱۳/۵، ۹/۳ و ۵/۵ درصد به ترتیب مربوط به ارقام قدسی، گیلانه و هاشمی بود (جدول ۵)، همچنین باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶، با افزایش سطوح روی تعداد کل پنجه در هر سه رقم برنج افزایش یافت. بیشترین میزان افزایش تعداد پنجه در هر گلدان به دلیل تاثیر روی، ۵، ۳، ۲ درصد به ترتیب مربوط به ارقام قدسی، گیلانه و هاشمی بود که با توجه به کارایی جذب روی بهتر در رقم قدسی (Mahmoudsoltani and Allagholipour., 2021) این نتیجه قابل انتظار بود (جدول ۶).

جدول ۵. مقایسه میانگین صفات گیاهی ارقام برنج در اثر متقابل تیمارهای رقم و آرسنیک

ارقام برنج	آرسنیک(میلی‌گرم بر کیلوگرم)	تعداد کل پنجه در بوته	درصد باروری پنجه‌ها	وزن هزار دانه (گرم)
هاشمی	صفر	۱۲/۸ g	۸۱/۶b	۲۵/۲ a
هاشمی	۱	۱۲/۵ h	۸۱/۱b	۲۴/۷ b-d
هاشمی	۲	۱۲/۱ i	۸۱ bc	۲۴/۵ c-e
گیلانه	صفر	۲۱/۵ a	۸۰/۲c	۲۴/۷ bc
گیلانه	۱	۲۰/۵ b	۷۸/۲ e	۲۴/۶ c-e
گیلانه	۲	۱۹/۵ c	۷۵/۹f	۲۴/۵ e
قدسی	صفر	۱۵/۵ d	۸۲/۸a	۲۴/۸ b
قدسی	۱	۱۴/۴ e	۷۹/۲ d	۲۴/۶ b-e
قدسی	۲	۱۳/۴ f	۷۶/۶f	۲۴/۵ de

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌دار ندارند.

جدول ٦- مقایسه میانگین صفات گیاهی ارقام برنج و محتوای روی خاک و آرسنیک دانه در اثر متقابل تیمارهای رقم و روی

ارقام برنج	روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)	تعدادپنجه کل دربوته	تعداد پنجه بارور دربوته	درصد باروری پنجه‌ها	وزن هزار دانه(گرم)	محتوای روی در خاک(میلی‌گرم بر کیلوگرم)	محتوای آرسنیک در دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
هاشمی	صفر	۱۲/۴i	۹/۳i	۷۴/۹ g	۲۴/۲d	۷۱/۱×۱۰$^{-۳}$d	۰/۵۰×۱۰$^{-۳}$b
هاشمی	۱۰	۱۲/۵h	۱۰/۱h	۸۰/۷ d	۲۴/۵c	۵۶۹/۷×۱۰$^{-۳}$c	۰/۲۰×۱۰$^{-۳}$d-f
هاشمی	۲۰	۱۲/۶g	۱۰/۶f	۸۴/۱ c	۲۵/۷a	۱۴۲۷/۴×۱۰$^{-۳}$a	۰/۱۵×۱۰$^{-۳}$f
گیلانه	صفر	۲۰/۲c	۱۴/۸c	۷۴/۸ g	۲۴/۱d	۲۱/۱×۱۰$^{-۳}$d	۰/۶۲×۱۰$^{-۳}$a
گیلانه	۱۰	۲۰/۵b	۱۶/۰b	۷۸/۲ f	۲۴/۴c	۵۱۹/۷×۱۰$^{-۳}$c	۰/۲۸×۱۰$^{-۳}$de
گیلانه	۲۰	۲۰/۸a	۱۷/۹a	۸۶/۱ a	۲۵/۳b	۱۱۸۹/۵×۱۰$^{-۳}$b	۰/۱۸×۱۰$^{-۳}$ef
قدسی	صفر	۱۴/۱f	۱۰/۴g	۷۳/۷ h	۲۴/۱d	۲۱/۹×۱۰$^{-۳}$d	۰/۴۴×۱۰$^{-۳}$c
قدسی	۱۰	۱۴/۴e	۱۱/۵e	۷۹/۸ e	۲۴/۴c	۵۵۱/۴×۱۰$^{-۳}$c	۰/۳۰×۱۰$^{-۳}$d
قدسی	۲۰	۱۴/۸d	۱۲/۵d	۸۴/۷ b	۲۵/۳b	۱۳۴۴/۰×۱۰$^{-۳}$a	۰/۲۲×۱۰$^{-۳}$d-f

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌دار ندارند

تعداد پنجه بارور در بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که علاوه بر معنی‌داری اثرات ساده رقم، روی و آرسنیک، برهمکنش رقم×روی ($p\leq$۰/۰۱) بر تعداد پنجه بارور دربوتهتاثیر معنی‌داری داشت(جدول۳). مقایسه میانگین تاثیر سطوح مختلف آرسنیک بر تعداد پنجه بارور نشان داد که با افزایش میزان آرسنیک، تعدادپنجه بارور کاهش یافت، بطوریکه میزان افزایش تعداد پنجه بارور در عدم مصرف آرسنیک (۱۲/۹ عدد) نسبت به مصرف دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک (۱۲/۲ عدد)، ۵/۷ درصد افزایش را نشان داد(جدول ۴). مقایسه میانگین برهمکنش رقم×روی در تعداد پنجه بارور دربوته نشان داد که بیشترین میزان افزایش تعداد پنجه در رقم گیلانه با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک (۱۷/۹عدد) بوده که نسبت به رقم هاشمی بدون مصرف روی (۹/۳عدد)، ۸۵/۰۵ درصد افزایش را نشان داد(جدول ۶). اولین جزء عملکرد

که بوسیله عوامل ژنتیکی کنترل می‌شود، تعداد خوشه یا پنجه‌های بارور هر بوته است، عملکرد دانه غلات تا حد زیادی به پنجه‌های بارور در بوته بستگی دارد. لازمه دستیابی به عملکرد بالا در برنج وجود تعداد کافی پنجه بارور در واحد سطح است، عنصر روی با تاثیر بر بسیاری از فرآیندهای بیولوژیک گیاه مانند متابولیسم اکسین و فعالیت آنزیم‌ها و سنتز نوکلئوتیدها نقش موثری بر تولید پنجه در گیاهان زراعی داشته و بنابراین با افزایش میزان روی قابل جذب خاک، تعداد پنجه بارور در برنج افزایش می‌یابد (**Mahmoudsoltani., 2018**).

درصد باروری پنجه‌ها

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد علاوه برمعنی‌داری اثرات ساده رقم، روی و آرسنیک، برهمکنش رقم×روی (**p≤۰/۰۱**) و برهمکنش رقم×آرسنیک (**p≤۰/۰۱**) بر درصد باروری پنجه‌ها تاثیر معنی‌داری داشت (جدول۳). مقایسه میانگین برهمکنش رقم×آرسنیک نشان داد که بیشترین درصد باروریپنجه‌ها در رقم قدسی بدون مصرف آرسنیک (۸۲/۸درصد) بوده که نسبت به رقم گیلانه با مصرف دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک (۷۵/۹درصد)، ۱۰ درصد افزایش داشت(جدول۵).مقایسه میانگین برهمکنش رقم×روی نشان داد که بیشترین میزان افزایش درصد باروری پنجه‌هادر رقم گیلانه با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک بوده که نسبت به رقم قدسی بدون مصرف روی،۱۷ درصد افزایش داشت (جدول ۶).عنصر روی با افزایش میزان روی قابل جذب خاک، باعث افزایش تعداد پنجه بارور و در نتیجه افزایش درصد باروری پنجه‌ها می‌شود. مطالعات نشان داده است که مصرف روی به میزان ۲۰ کیلوگرم در هکتار به شکل سولفات روی باعث افزایش معنی‌دار درصد باروری پنجه‌ها در رقم گیلانه به میزان ۱۰۱درصد شد (Mahmoudsoltani and Allagholipour., 2021).

طول خوشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش سه عامل رقم×روی×آرسنیک (p≤۰/۰۱) بر طول خوشه تاثیر معنی‌داری داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات سه‌گانه نشان دادکه بیشترین میزان افزایش(۲۸/۹ سانتی‌متر)در رقم قدسی و با مصرف ۲۰ کیلوگرم روی در هکتار و عدم مصرف آرسنیک بوده که نسبت به کمترین میزان طول خوشه (۲۲ سانتی‌متر) در رقم گیلانه و با عدم مصرف روی و با مصرف دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک، ۳۱/۵ درصد افزایش را داشت (جدول۷). در بین ارقام به ترتیب قدسی و هاشمی بیشترین طول خوشه را داشتند، همچنین طول خوشه با افزایش مصرف کود روی و کاهش میزان مصرف آرسنیک، افزایش یافت.

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۷) با افزایش سطوح روی و کاهش سطوح آرسنیک، طول خوشه در هر سه رقم در بیشترین مقدار بود. بیشترین میزان کاهش طول خوشه به دلیل تاثیر منفی آرسنیک ۸/۳، ۸ و ۷/۷ درصد به ترتیب مربوط به ارقام قدسی،گیلانه و هاشمی بود که همگی در تیمار دو میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک و بدون مصرف عنصر روی بدست آمد. همچنین بیشترین تاثیر بهبود طول خوشه ناشی از کاهش اثرات منفی کاربرد دو میلی گرم در کیلوگرم آرسنیک توسط ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک (بیشینه‌های مصرف هر دو عنصر) به میزان ۶/۱، ۶ و ۵/۹ درصد، به ترتیب مربوط به رقم قدسی، گیلانه و هاشمی بود. به نظر می‌رسد که کارایی بالای جذب روی در رقم قدسی (Mahmoudsoltani and Allagholipour, 2021) علت این موضوع بوده است(جدول ۷).

(Mahmoudsoltani et al., 2017) گزارش نمودند که طول خوشه برنج رقم هاشمی با کاربرد ۲۰ کیلوگرم سولفات روی در هکتار (۲۳/۷ سانتی‌متر) بوده که نسبت به شاهد بدون مصرف کود روی ۸/۷ درصد افزایش داشت. همچنین Rahman et al. (2011) و Mahmoudsoltaniet al., (2016 and 2017) گزارش نمودند که طول خوشه برنج به ترتیب با مصرف خاکی ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم سولفات روی در هکتار افزایش یافت. تاثیر روی بر افزایش طول خوشه احتمالا به این دلیل است که این عنصر در فعالیت آنزیم تریپتوفان سینتتاز به عنوان پیش ماده تولید اکسین موثر است. درنتیجه، با افزایش تولید اکسین و متعاقب آن افزایش رشد طولی ساقه و شاخساره دور از انتظار نخواهد بود (Kumar et al., 2020). Shivay et al. (2015) نیز افزایش ۸/۳ درصدی طول خوشه در برنج را با مصرف پنج کیلوگرم روی در هکتار به صورت خاکی گزارش نمودند.

جدول ۷- مقایسه میانگین عملکرد دانه و طول خوشه ارقام برنج در اثر متقابل تیمارهای روی و آرسنیک

ارقام برنج	روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)	آرسنیک (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)	عملکرد دانه (گرم در بوته)	طول خوشه (سانتی‌متر)
	صفر	صفر	۸۴/۷ o	۲۴/۳ o
	صفر	۱	۷۸ q	۲۴/۲ p
	صفر	۲	۷۱/۶ s	۲۴ pq
	۱۰	صفر	۸۶/۹ n	۲۵/۳ l
هاشمی	۱۰	۱	۷۹/۱ q	۲۵ m
	۱۰	۲	۷۳/۳ s	۲۴/۸ n
	۲۰	صفر	۸۷/۹ mn	۲۶ j
	۲۰	۱	۸۲/۶ p	۲۵/۹ j
	۲۰	۲	۷۶/۱ r	۲۵/۵ k
	صفر	صفر	۱۱۰/۱ bc	۲۲/۶ y
	صفر	۱	۱۰۴/۶ f	۲۳/۴ st
	صفر	۲	۱۰۰/۶ hi	۲۲ z
	۱۰	صفر	۱۱۱/۳ ab	۲۳/۲ tw
گیلانه	۱۰	۱	۱۰۶/۹ de	۲۳ wx
	۱۰	۲	۱۰۱/۶ g-i	۲۲/۹ x
	۲۰	صفر	۱۱۳/۴ a	۲۳/۹ qr
	۲۰	۱	۱۰۸/۹ cd	۲۳/۷ r
	۲۰	۲	۱۰۲/۴ gh	۲۳/۴ s
	صفر	صفر	۱۰۵/۴ ef	۲۷ g
	صفر	۱	۹۷/۹ j	۲۶/۹ h
	صفر	۲	۸۹/۰۳ m	۲۶/۵ i
	۱۰	صفر	۱۰۷/۱ de	۲۸ d
قدسی	۱۰	۱	۱۰۰/۲ i	۲۷/۸ e
	۱۰	۲	۱۰۲/۵ g	۲۷/۴ f
	۲۰	صفر	۱۱۰/۳ bc	۲۸/۹ a
	۲۰	۱	۹۴/۱ l	۲۸/۶ b
	۲۰	۲	۹۵/۹ k	۲۸/۲ c

در هر ستون تیمارهایی که حداقل یک حرف مشترک دارند، تفاوت معنی داری از نظر آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد ندارند

وزن هزاردانه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که علاوه برمعنی‌داری اثرات ساده رقم، روی و آرسنیک، برهمکنش رقم×روی ($p\leq$۰/۰۵) و برهمکنش رقم×آرسنیک ($p\leq$۰/۰۵) و برهمکنش روی×آرسنیک ($p\leq$۰/۰۱) بر وزن هزاردانه معنی‌دار بود (جدول۳). مقایسه میانگین برهمکنش رقم×روی نشان داد که بیشترین میزان افزایش وزن هزاردانه در رقم هاشمی با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک(۲۵/۷ گرم) بوده که نسبت به رقم گیلانه بدون مصرف روی (۲۴/۱گرم) ۶/۶ درصد افزایش داشت (جدول ۶). مقایسه میانگین برهمکنش رقم×آرسنیک نشان داد که بیشترین میزان افزایش وزن هزار دانه (۲۵/۲ گرم) در رقم هاشمی بدون مصرف آرسنیک بوده که نسبت به رقم گیلانه (۲۴/۵ گرم)، با کاربرد دومیلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک،۳ درصد افزایش داشت (جدول۵). مقایسه میانگین برهمکنش روی×آرسنیک در وزن هزاردانه نشان داد که بیشترین میزان وزن هزار دانه(۲۵/۹ گرم) با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک و بدون مصرف آرسنیک بوده که نسبت به عدم مصرف روی و کاربرد دومیلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک (۲۴/۱ گرم)، ۷/۵ درصد افزایش داشت (جدول۸). بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۵) بیشترین میزان کاهش وزن هزاردانه به دلیل تاثیر منفی آرسنیک ۲/۸، ۱/۲ و ۱ درصد به ترتیب مربوط به ارقام هاشمی، قدسی و گیلانه بود. همچنین بیشترین تاثیر بهبود وزن هزار دانه ناشی از کاهش اثرات منفی کاربرد دو میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک با سطوح مختلف روی به میزان ۲/۹، ۱/۳ و ۰/۵ درصد به‌ترتیب مربوط به ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک، ۱۰میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک و سطح صفر روی به ثبت رسید که با توجه به اثر متقابل میان روی و

آرسنیک این نتیجه قابل انتظار بود (جدول ۸).

جدول ۸- مقایسه میانگین صفات گیاهی ارقام برنج و محتوای روی و آرسنیک گیاه و خاک در برهمکنش تیمارهای روی و آرسنیک

سطوح روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)	سطوح آرسنیک (میلی‌گرم برکیلوگرم خاک)	وزن هزاردانه (گرم)	محتوای روی در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	محتوای روی در کاه و کلش (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	محتوای روی در دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	محتوای آرسنیک در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	محتوای آرسنیک در کاه و کلش (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	محتوای آرسنیک در دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
صفر	صفر	۲۴/۲d-f	۰/۰۸ f	۵ ×۱۰$^{-۳}$ef	۰ e	۰ d	۰ e	۰ f
صفر	۱	۲۴/۱۴ ef	۰/۰۳ f	۲/۷ ×۱۰$^{-۳}$f	۰ e	۷/۸×۱۰$^{-۳}$c	۲/۵×۱۰$^{-۳}$c	۰/۳ ×۱۰$^{-۳}$d
صفر	۲	۲۴/۱f	۰/۰۲ f	۱/۸ ×۱۰$^{-۳}$f	۰ e	۱۸×۱۰$^{-۳}$a	۸/۲ ×۱۰$^{-۳}$a	۱/۳×۱۰$^{-۳}$a
۱۰	صفر	۲۴/۶c	۰/۶۹ d	۱۹/۷ ×۱۰$^{-۳}$c	۴/۷ ×۱۰$^{-۳}$c	۰ d	۰ e	۰ f
۱۰	۱	۲۴/۴cd	۰/۵۱ e	۱۳/۸ ×۱۰$^{-۳}$d	۳/۱ ×۱۰$^{-۳}$cd	۶/۲ ×۱۰$^{-۳}$c	۱/۹ ×۱۰$^{-۳}$cd	۰/۱×۱۰$^{-۳}$e
۱۰	۲	۲۴/۳de	۰/۴۴ e	۸ ×۱۰$^{-۳}$e	۱/۸ ×۱۰$^{-۳}$de	۱۶/۳ ×۱۰$^{-۳}$a	۶/۷ ×۱۰$^{-۳}$a	۰/۷ ×۱۰$^{-۳}$b
۲۰	صفر	۲۵/۹a	۱/۶۳ a	۵۰ ×۱۰$^{-۳}$a	۱۵/۴ ×۱۰$^{-۳}$a	۰ d	۰ e	۰ f
۲۰	۱	۲۵/۳b	۱/۴ b	۴۹/۳ ×۱۰$^{-۳}$a	۱۲/۳×۱۰$^{-۳}$b	۵/۹ ×۱۰$^{-۳}$c	۰/۸×۱۰$^{-۳}$de	۰/۰۵×۱۰$^{-۳}$ef
۲۰	۲	۲۵/۱b	۰/۹۳ c	۳۶/۷ ×۱۰$^{-۳}$b	۱۰/۶ ×۱۰$^{-۳}$b	۱۳/۴ ×۱۰$^{-۳}$b	۵×۱۰$^{-۳}$b	۰/۵ ×۱۰$^{-۳}$c

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون جدول تفاوت معنی‌دار با یکدیگر ندارند.

وزن هزاردانه در گیاه برنج از پایدارترین صفت‌ها بشمار می‌آید، زیرا رشد دانه در این گیاه با پوست خارجی آن محدود است. با این وجود به نظر می‌رسد کاربرد کود روی با بهبود پرشدن دانه تاثیر مثبتی بر وزن هزاردانه داشته و باعث افزایش در این صفت شد (Rahman et al., 2011; Wu et al., 2020). به نظر می‌رسد که افزایش وزن هزاردانه در اثر مصرف روی به دلیل افزایش مواد ذخیره شده و کاهش محدودیت منبع می‌باشد که موجب سرازیر شدن مواد پرورده به سمت دانه شده و دانه‌های پُرتری شکل می‌گیرند (Broadly et al., 2007). همچنین، پژوهشگران مهم‌ترین دلیل افزایش وزن هزاردانه را افزایش و بهبود فرآیند انتقال مجدد موادغذایی و افزایش انتقال اولیه به وسیله تحریک هورمون‌ها و افزایش انتقال در آوند آبکش اعلام کرده و گزارش نمودند که تاثیر سولفات روی بر افزایش کارایی آوندآبکش در انتقال موادغذایی به دانه و پرشدن آن از مهم‌ترین عوامل تاثیر سولفات‌روی بر افزایش وزن هزاردانه است (Jiang et al., 2007;Mahmoudsoltani and Allagholipour, 2021).

عملکرد دانه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌هامعنی دار بودن ($p\leq ۰/۰۱$) برهمکنش سه عامل رقم×روی×آرسنیک، بر عملکرد دانه را نشان داد (جدول۳). بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها بیشترین میزان عملکرددانه (۱۱۳/۴ گرم در بوته) به رقم گیلانه با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک و عدم مصرف آرسنیک تعلق داشت که نسبت به کمترین میزان عملکرد (۷۱/۶ گرم در بوته) در رقم هاشمی با عدم مصرف روی و با مصرف دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک، ۵۸/۵ درصد افزایش داشت (جدول ۷). همچنین میزان عملکرد در بین هر رقم نیز نشان دهنده این است که بیشترین میزان عملکرد با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک و عدم مصرف آرسنیک بوده و کمترین میزان عملکرد در میان ارقام برنج با عدم مصرف روی و مصرف دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک بدست آمد(جدول ۷).میزان عملکرد با افزایش مصرف روی و کاهش مقدارآرسنیک، افزایش و با افزایش سطوح آرسنیک و کاهش سطوح روی، کاهش می‌یابد.بالاترین میزان عملکرد در اثر روی به ترتیب در ارقام گیلانه>قدسی>هاشمی مشاهده شد (جدول ۷).

با بررسی اثرات مصرف کودروی بر صفات کمی وکیفی برنج رقم چرام گزارش شده که مصرف روی از منبع سولفات روی به طور معنی‌داری باعث افزایش عملکرد دانه (۵۶/۹ درصد) شد (Chakeralhosseini et al., 2009). پژوهشگران دیگری نیزگزارش کردندکه مصرف سولفات روی،ارتفاع بوته، طول خوشه، میزان پرشدن دانه، وزن هزاردانه و در نهایت عملکرد را در برنج افزایش می‌دهد (Zhu et al., 2008;Huang, 2021). ازدلایل افزایش عملکرد برنج بر اثر مصرف سولفات روی، افزایش غلظت نیتروژن، افزایش میزان کلروفیل و افزایش ساقه، برگ و عملکرد گیاه می‌شود (Teale etal., 2007). گزارش شده است که عنصر روی میزان فتوسنتز و دوام سطح برگ را افزایش داده و در نتیجه میزان تولید موادپرورده افزایش می‌یابد (Yousefi and Zandi, 2012;Faizan et al., 2021).

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۷) بیشترین میزان کاهش عملکرد به دلیل تاثیر منفی آرسنیک ۱۹/۲۹، ۱۸/۶۴ و ۱۱/۳۳ درصد به ترتیب مربوط به ارقام قدسی، هاشمی و گیلانه بود که همگی در تیمار دو میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک و بدون مصرف عنصر روی بدست آمدند. همچنین بیشترین تاثیر بهبود عملکرد ناشی از کاهش اثرات منفی کاربرد دو میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک در اثر کاربرد ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک (بیشینه‌های مصرف هر دو عنصر) به میزان ۸، ۶ و ۲ درصد، به ترتیب مربوط به رقم قدسی، هاشمی و گیلانه به ثبت رسید. به نظر می‌رسد که کارایی بالای جذب روی در رقم قدسی (Mahmoudsoltani and Allagholipour, 2021) علت این موضوع بوده است.

محتوای روی خاک،کاه و کلش و دانه ارقام برنج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که علاوه برمعنی‌داری اثرات ساده رقم، روی و آرسنیک، برهمکنش رقم×روی ($p\leq$۰/۰۱) و برهمکنش روی×آرسنیک ($p\leq$۰/۰۱) بر محتوایروی در خاک تاثیر معنی‌داری داشت (جدول۳). مقایسه میانگین برهمکنش رقم×روی نشان داد که بیشترین میزان روی در خاک در رقم هاشمی با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک (۱/۴میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده که نسبت به رقم گیلانه بدون مصرف روی (۰/۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) ، ۶۷۶ درصد افزایش داشت (جدول ۶). در بررسی ۲۷ رقم بومی، اصلاح شده و لاین امیدبخش برنج در دو تیمار صفر و ۲۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی، برهمکنش رقم و میزان روی موجود در خاک نشان‌دهنده متفاوت بودن واکنش ارقام مورد بررسی به میزان روی موجود در خاک بود (Mahmoudsoltani and Allagholipour, 2021). مقایسه میانگین برهمکنش روی×آرسنیک در میزان روی در خاک نشان داد که بیشترین میزان افزایش با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاکو بدون کاربرد آرسنیک (۱/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده که نسبت به عدم مصرف روی و کاربرد دومیلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک (۰/۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، افزایش چشمگیری داشت (جدول۸). بررسی نتایج برهمکنش عامل‌های مورد آزمایش برای میزان جذب روی در خاک نشان داد که موثرترین ترکیب برای افزایش جذب روی در خاک مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک بوده است. با افزایش سطوح آرسنیک محتوای روی در خاک کاهش پیدا کرد، بطوریکه در سطح دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک، کمترین میزان روی در خاک در هر سه سطح روی مشاهده شد (جدول ۸).کود سولفات روی بعلت حلالیت بیشتر و در نتیجه آزادسازی سریع‌تر روی و توان تولید محیط اسیدی‌تر در افزایش فراهمی روی در خاک موثرتر است (Cakmak., 2008; Rehman et al. 2012; Shivay et al., 2015). Mahmoudsoltani et al (2016,2017) نشان دادند که با مصرف ۵ و ۱۰ کیلوگرم روی در هکتار میزان روی قابل جذب خاک افزایش چشمگیری در مراحل مختلف رشد گیاه برنج داشت.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد علاوه برمعنی‌داری اثرات ساده رقم، روی و آرسنیک، برهمکنش روی×آرسنیک ($p\leq$۰/۰۱) بر محتوای روی در کاه وکلش تاثیر معنی‌داری داشت (جدول۳). مقایسه میانگین اثرات ساده رقم بر این صفت نشان داد که بیشترین میزان افزایش در رقم هاشمی با میانگین ۰/۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده که نسبت به رقم گیلانه (۰/۰۱۸میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ۲۷ درصد افزایش داشت (جدول ۴). همچنین مقایسه میانگینبرهمکنش روی×آرسنیک (جدول ۸) در محتوای روی کاه و کلش نشان داد که بیشترین میزان افزایش روی با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی ۲۲درصد و بدون کاربرد آرسنیک(۰/۰۵میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود که نسبت به عدم مصرف روی و کاربرد دومیلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک (۰/۰۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ۲۸۳درصد افزایش داشت (جدول۸). بررسی نتایج برهمکنش عامل‌های مورد آزمایش برای میزان جذب روی در کاه وکلش نشان دادکه با افزایش مصرف روی از سطح صفر تا سطح ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک،میزان این عنصر در ساقه افزایش یافته و با افزایش سطوح روی میزان آرسنیک در ساقه کاهش می‌یابد (جدول ۸).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فقط برهمکنش روی×آرسنیک بر محتوای روی در دانه ارقام برنج تاثیر معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) داشت(جدول۳). مقایسه میانگین برهمکنش روی×آرسنیک در محتوای روی در دانه(جدول۸) نشان داد که بیشترین میزان افزایش با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک و بدون کاربرد آرسنیک (۰/۰۱۵میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده که نسبت به عدم مصرف روی و کاربرد دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک (صفرمیلی‌گرم بر کیلوگرم)، ۵۴ درصد افزایش داشت. بررسی نتایج برهمکنش عامل‌های مورد آزمایش برای میزان جذب روی در دانه نشان دادکه موثرترین ترکیب برای افزایش جذب روی در دانه مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک و عدم مصرف آرسنیک است (جدول ۸).در آزمایش حاضر، با افزایش غلظت سولفات روی، میزان عنصر روی در خاک و گیاه افزایش یافت. به عبارت دیگر، بین میزان سطوح سولفات روی و غلظت روی جذب شده در خاک و گیاه رابطه مثبتی مشاهده شد. از طرفی بین میزان سطوح آرسنیک و غلظت روی جذب شده در خاک و گیاه رابطه منفی مشاهده شد،در نتیجه بیشترین محتوای غلظت روی به

ترتیب در (خاک>کاه و کلش>دانه) و در میان ارقام به ترتیب (هاشمی>قدسی> گیلانه) مشاهده شد (جدول ۸). افزایش غلظت روی در دانه برنج در اثر مصرف سولفات روی نشان دهنده توانایی در قابلیت دسترسی به این عنصر در خاک است که ممکن است به واسطه بهبود فعالیت آنزیمی و فرآیندهای متابولیکی گیاه باشد که در نهایت منجر به افزایش جذب روی می‌شود (Khan, 2012). در یک آزمایش مشخص شد که مصرف ۱۳/۵ کیلوگرم روی در هکتار باعث افزایش غلظت روی در دانه برنج گردید. با افزایش جذب روی توسط گیاهان، روی در همه اندام‌های گیاه تجمع پیدا کرد که در اندام‌های رویشی به خصوص در ساقه و غلاف برگ (۴۰۰–۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) بیشتر از اندام‌های زایشی (در دانه ۵۰–۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود (Jiang et al., 2007).

محتوای آرسنیک خاک،کاه و کلش و دانه ارقام برنج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فقط برهمکنش روی×آرسنیک بر میزان آرسنیک در خاک تاثیر معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) داشت(جدول۳). مقایسه میانگینبرهمکنش روی×آرسنیک در میزان آرسنیک در خاک نشان داد که بیشترین میزان آرسنیک در خاک در تیمار بدون کاربرد روی و با کاربرد دومیلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک به میزان ۰/۰۱۸میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد و کمترین میزان آرسنیک در خاک به میزان (صفرمیلی‌گرم بر کیلوگرم)، در تیمارهای بدون کاربرد آرسنیک مشاهده شد (جدول۸). بررسی نتایج برهمکنش عامل‌های مورد آزمایش نشان داد که با افزایش کاربرد سطوح روی از صفر تا سطح ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، میزان آرسنیک در خاک کاهش می‌یابد، بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها،میزان غلظت آرسنیک در خاک با کاربرد ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات روی نسبت به میزان غلظت آرسنیک بدون کاربرد سولفات روی، ۹/۵ درصد و میزان غلظت آرسنیک در خاک با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات روی نسبت به میزان غلظت آرسنیک بدون کاربرد سولفات روی، ۲۴/۵ درصد کاهش داشت(جدول ۸) که به دلیل تاثیر روی بر کاهش آرسنیک می‌باشد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فقط برهمکنش روی×آرسنیک ($p\leq$۰/۰۱) بر محتوای آرسنیک در کاه و کلش تاثیر معنی‌داری داشته است و عامل رقم تاثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت (جدول۳). مقایسه میانگینبرهمکنش روی×آرسنیک نشان داد که با افزایش سطوح روی از سطح صفر تا سطح ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، میزان آرسنیک در کاه و کلش کاهش یافت، بطوریکه بیشترین میزان آرسنیک در کاه و کلش در تیمار بدون کاربرد روی و با کاربرد دومیلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک به میزان ۰/۰۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم،مشاهده شده و کمترین میزان آرسنیک در کاه و کلش به میزان (صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم)، در تیمارهای بدون کاربرد آرسنیک مشاهده شد(جدول۸).بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها غلظت آرسنیک در کاه و کلش با کاربرد ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات روی نسبت به میزان غلظت آرسنیک بدون کاربرد سولفات روی، ۱۸ درصد و میزان غلظت آرسنیک در کاه و کلش با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات روی نسبت به میزان غلظت آرسنیک بدون کاربرد سولفات روی، ۴۰ درصد کاهش پیدا کرد (جدول ۸) که به دلیل تاثیر روی بر کاهش آرسنیک می‌باشد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهمکنش رقم×روی ($p\leq$۰/۰۵) و برهمکنش روی×آرسنیک ($p\leq$۰/۰۱) بر محتوای آرسنیک دانه تاثیر معنی‌داری داشته است (جدول۳). مقایسه میانگین برهمکنش رقم×روی (جدول ۶)نشان داد که بیشترین میزان آرسنیک در دانه در رقم گیلانه و عدم مصرف روی به میزان ۰/۰۰۷میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و کمترین میزان آرسنیک در دانه در رقم هاشمی و با کاربرد ۲۰ میلی‌گرمروی در کیلوگرم خاک به میزان ۰/۰۰۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. Hussain et al., (2021)نیز بر اهمیت انتخاب ژنوتیپ‌های برنج در کنترل تجمع آرسنیک در دانه برنج تاکید داشتند و اعلام کردند که باید قبل از برنامه اصلاحی خاک‌های شالیزاری، برای محدود کردن مواجهه انسان با آرسنیک از طریق دانه برنج مورد توجه قرار گیرند.اصلاح ارقام جدید برنج با قابلیت تجمع کم آرسنیک در دانه برای برآوردن نگرانی‌های ایمنی و امنیت غذایی در سراسر جهان ضروری است(Mawia et al., 2021).

مقایسه میانگین برهمکنش روی×آرسنیک (جدول ۸) نشان داد که بیشترین میزان آرسنیک در دانه با مصرف دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک و عدم مصرف روی (۰/۰۰۱میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده و کمترین میزان آرسنیک در دانه (صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمارهای بدون کاربرد آرسنیک مشاهده شد (جدول۸). بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها غلظت آرسنیک در دانه با کاربرد ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات روی نسبت به غلظت آرسنیک بدون کاربرد سولفات روی، ۴۶ درصد و غلظت آرسنیک در دانه با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات روی نسبت به غلظت آرسنیک بدون کاربرد سولفات روی، ۶۲ درصد کاهش داشت (جدول ۸) که به نظر می‌رسد

مصرف سولفات روی با افزایش تشکیل رسوب روی بر سطح ریشه‌ها، باعث کاهش سمیت آرسنیک در برنج می‌شود(Zhao et al., 2009). فراهمی روی بر مقاومت برنج در برابر سمیت آرسنیک با افزایش جوانه‌زنی، تولید زیست‌توده و جذب روی و کاهش جذب آرسنیک موثر می‌باشد (Wu et al., 2020).

غلظت آرسنیک از خاک تا دانه در سطوح صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات روی و سطوح صفر، یک و دو میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک روند کاهشی و نزولی داشت که این کاهش آرسنیک در حضور روی بدلیل تثبیت آرسنیک به صورت آرسنات روی می‌باشد. آرسنات روی تحرک کمی داشته و در گیاهان غیرقابل دسترس است، این موضوع نشان می‌دهد که بر اساس مدل فعالیت یون آزاد–Free Ion Activity Model(FIAM)، روی می‌تواند تجمع آرسنیک در گیاهان را کاهش دهد (Degryse et al., 2006). گزارش شده که سمیت آرسنیک را می‌توان با استفاده از سولفات روی، آهن و آلومینیوم در خاک، کاهش داد (Brady and Weil., 2004; Huang et al., 2021).

در آزمایشی که در محیط آبکشت و در حضور آرسنیک نشاندار (^{73}As) اجرا شد، در حدود ۹۰ درصد آرسنیک جذب شده در ریشه‌های برنج باقی مانده و تنها ۱۰ درصد آن به بخش هوایی گیاه انتقال یافت (Zhao et al., 2012). واقعیت این است که تحرک آرسنیک در گیاه برنج نسبت به سایر غلات بیشتر بوده است (Su et al., 2010) و این موضوع به توزیع قطبی ناقل‌های مربوط به جریان رو به داخل و رو به خارج اسید سیلیسیک/آرسنیت در سلول‌های اگزودرم و آندودرم ریشه گیاه برنج نسبت داده شده است که این موضوع انتقال کارآمد این دومولکول به سوی استوانه مرکزی و بارگیری آنها در آوند چوبی را امکان‌پذیر می‌کند. با توجه به تحرک و افزایش فراهمی زیستی عنصر سمی آرسنیک در خاک‌های بی‌هوازی، مقادیر نسبتا اندک آرسنیک خاک نیز مسمومیت آرسنیک و کاهش عملکرد دانه برنج را به دنبال دارد (Dittmar et al., 2010). استفاده مداوم آب‌های آرسنیک‌دار باعث افزایش آرسنیک خاک می‌شود که با مصرف ۲۵ کیلوگرم در هکتار سولفات روی می‌توان تجمع آرسنیک در خاک را کاهش داد (Garai et al., 2000; Murphy et al.,2019). Das et al (2005)گزارش کردند که تجمع آرسنیک در ریشه، ساقه، برگ‌ها و دانه‌های برنج با استفاده از عنصر روی، مدیریت آب آبیاری یا هردو به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

Yan et al., (2021)گزارش نمودند که استفاده ازنانو ذرات اکسید روی به عنوان کود برای تقویت رشد گیاه و کاهش تجمع آرسنیک در برنج قابل توصیه است. محلول‌پاشی نانوذره اکسید روی در حضور سالیسیلیک اسید، تنش اکسیداتیو ناشی از آرسنیک را با تحریک آنی سیستم آنتی‌اکسیدانی در گیاه برنج بهبود می‌بخشد (Faizan et al., 2021).گزارش شده است که با افزایش مصرف روی (۲۰ کیلوگرم در هکتار)، محتوای آرسنیک خاک کاهش یافته و با توجه به تعامل منفی بین روی و آرسنیک محتوای آرسنیک با افزایش مصرف روی، کاهش یافت. بالاترین میزان آرسنیک در گیاه برنج در ریشه‌ها نسبت به ساقه‌ها، برگ‌ها و دانه‌ها (توزیع آرسنیک: ریشه‌ها> ساقه‌ها> برگ‌ها> بخش خوراکی) ثبت شد. گزارش شده است که افزایش در میزان آرسنیک خاک با کاهش مصرف روی مانند سولفات روی همبستگی دارد (Das et al., 2005, 2008; Murphy et al., 2019).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که مصرف عنصر روی در قالب کودهای حاوی روی، بویژه در شرایط سمیت آرسنیک از مهم‌ترین روش‌های به زراعی برای افزایش عملکرد برنج می‌باشد. کاه و کلش و دانه، در ارقام برنج هاشمی، قدسی و گیلانه به‌ترتیب بالاترین محتوای روی را داشتندو رقم هاشمی و قدسی از نظر جذب روی کارآمدتر و برای مقابله با سمیت آرسنیک متحمل‌تر به نظر می‌رسند. به‌علاوه بیشترین میزان آرسنیک در کاه وکلش و دانه به‌ترتیب در ارقام گیلانه، قدسی و هاشمی مشاهده شد. بر اساس نتایج این آزمایش در زمین‌های آلوده به آرسنیک می‌توان با مصرف سولفات روی، محتوای آرسنیک را در خاک، کاه و کلش و دانه درحد معنی‌داری کاهش داد. با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی و استفاده از ارقام برنج هاشمی و قدسی که قابلیت جذب روی بالایی دارند، می‌توان ضمن بهبود صفات گیاهی و عملکرد دانه برنج محتوای آرسنیک را در خاک و درکاه و کلش و دانه برنج کاهش داد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Alloway, B. J. (2008). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health*, *31*(5), 537-548.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2004). Elements of the Nature and Properties of Soils Prentice-Hall. *Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA*.

Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, *173*(4), 677-702.

Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification?.*Plant and Soil*, *302*(1), 1-17.

Chakeralhossein, M. R., Mohtashami, R., & Owliaie, H. R. (2009). Effects of rate, source, and method of zinc fertilizer application on quantitative and qualitative characteristics of rice (cv: Choram 1). *Journal of Research in Agricultural Science*, *5*(1). 33-43. (In Farsi).

Craw, D., & Chappell, D. A. (2000). Metal redistribution in historic mine wastes, Coromandel Peninsula, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, *43*(2), 187-198.

Das, D. K., Garai, T. K., Sarkar, S., & Sur, P. (2005). Interaction of arsenic with zinc and organics in a rice (oryza sativa L.)–cultivated field in India. *TheScientificWorldJournal*, *5*, 646-651.

Das, D. K., Sur, P., & Das, K. (2008). Mobilization of arsenic in soils and in rice (*Oryza sativa* L.) plants affected by organic matter and zinc application in irrigation water contaminated with arsenic. *Plant Soil and Environment*, *54*(1), 30.

Degryse, F., Smolders, E., & Parker, D. R. (2006). Metal complexes increase uptake of Zn and Cu by plants: implications for uptake and deficiency studies in chelator-buffered solutions. *Plant and Soil*, *289*(1), 171-185.

Dittmar, J., Voegelin, A., Roberts, L. C., Hug, S. J., Saha, G. C., Ali, M. A., ... & Kretzschmar, R. (2010). Arsenic accumulation in a paddy field in Bangladesh: seasonal dynamics and trends over a three-year monitoring period. *Environmental science & technology*, *44*(8), 2925-2931.

Faizan, M., Sehar, S., Rajput, V. D., Faraz, A., Afzal, S., Minkina, T., ...& Faisal, M. (2021). Modulation of cellular redox status and antioxidant defense system after synergistic application of Zinc oxide nanoparticles and salicylic acid in rice (Oryza sativa) plant under arsenic stress. *Plants*, *10*(11), 2254.

FAO. (2018). Rice market monitor. Vol. XVI, *Trade and Markets Division*. Rome.

Gao, X., Hoffland, E., Stomph, T., Grant, C. A., Zou, C., & Zhang, F. (2011). Improving zinc bioavailability in transition from flooded to aerobic rice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *32*(2), 465-478.

Garai, T. K., Das, D. K., & Sarkar, S. (2000). Effect of iron and zinc application on the availability of native and applied arsenic simulating low land rice condition. In *International Conference on Managing Natural Resources for Sustainable Agricultural Production in the 21st Century, New Delhi, February* (pp. 14-18).

Guo, J., Dai, X., Xu, W., & Ma, M. (2008). Overexpressing GSH1 and AsPCS1 simultaneously increases the tolerance and accumulation of cadmium and arsenic in Arabidopsis thaliana. *Chemosphere*, *72*(7), 1020-1026.

Huang, G., Changfeng, D. I. N. G., Yibing, M. A., Yurong, W. A. N. G., Zhigao, Z. H. O. U., & Xingxiang, W. A. N. G. (2021). Rice (Oryza sativa L.) seedlings enriched with zinc or manganese: Their impacts on cadmium accumulation and expression of related genes. *Pedosphere*, *31*(6), 849-858.

Huq, S. I., & Naidu, R. (2003). Arsenic in groundwater of Bangladesh: Contamination in the food chain. *Arsenic contamination: Bangladesh perspective*, 203-226.

Hussain, M. M., Bibi, I., Niazi, N. K., Nawaz, M. F., & Rinklebe, J. (2021). Impact of organic and inorganic amendments on arsenic accumulation by rice genotypes under paddy soil conditions: A pilot-scale investigation to assess health risk. *Journal of Hazardous Materials*, *420*, 126620.

Jiang, W., Struik, P. C., Lingna, J., Van Keulen, H., Ming, Z., & Stomph, T. J. (2007). Uptake and distribution of root-applied or foliar-applied 65Zn after flowering in aerobic rice. *Annals of Applied Biology*, *150*(3), 383-391.

Khan, P., Memon, M.Y., Imtiaz, M., Depar, N., Aslam, M., Memon, M.S. and Shah, J.A. (2012). Determining the zinc requirements of rice genotype Sarshar evolved at NIA, Tandojam. *Sarhad Journal of Agriculture*, *28*(1), pp.1-7.

Khan, Z., Thounaojam, T. C., & Upadhyaya, H. (2022). Arsenic stress in Rice (Oryza sativa) and its

amelioration approaches. *Plant Stress*, 100076.
Kim, T., Mills, H. A., & Wetzstein, H. Y. (2002). Studies on the effect of zinc supply on growth and nutrient uptake in pecan. *Journal of Plant Nutrition*, *25*(9), 1987-2000.
Kumar, R., Kumar, M., Yadav, S., & Kumar, R. (2020). Effect of Sources and Methods of Zinc Application on Productivity, Nutrient Uptake and Zinc Use Efficiency of Basmati rice (*Oryza sativa* L.). *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, *9*(1), 2231-2242.
Li, R. Y., Ago, Y., Liu, W. J., Mitani, N., Feldmann, J., McGrath, S. P., ... & Zhao, F. J. (2009). The rice aquaporin *Lsi1* mediates uptake of methylated arsenic species. *Plant Physiology*, *150*(4), 2071-2080.
Ma, X., Sharifan, H., Dou, F., & Sun, W. (2020). Simultaneous reduction of arsenic (As) and cadmium (Cd) accumulation in rice by zinc oxide nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, *384*, 123802.
Mahmoudsoltani, S. (2018). Zinc deficiency, causes, symptoms and solutions. *Technical Bulletin. Rice research institute of Iran*: 31p.
Mahmoudsoltani, S. M., Hanafi, M. M., Samsuri, A. W., Muhammed, S. K. S., & Hakim, M. A. (2016). Rice growth improvement and grains bio-fortification through lime and zinc application in zinc deficit tropical acid sulphate soils. *Chemical Speciation & Bioavailability*, *28*(1-4), 152-162.
Mahmoudsoltani, S., & Allagholipoor, M. (2021). Screening Rice Varities for Higher Zn Efficiency in Paddy Field. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(7), 1881-1901.
Mahmoudsoltani, S., Mohamed, M. H., Abdul, W. S. and Sharifah, K. (2017). Lime and Zn interactions effects on yield, yield component, and quality of rice in Zn deficit tropical paddy soil. *Azarian Journal of Agriculture*, *4*(5), 185-192.
Majumder, B., Das, S., Pal, B., & Biswas, A. K. (2022). Influence of arsenate imposition on modulation of antioxidative defense network and its implication on thiol metabolism in some contrasting rice (Oryza sativa L.) cultivars. *BioMetals*, 1-28.
Mawia, A. M., Hui, S., Zhou, L., Li, H., Tabassum, J., Lai, C., ...& Hu, P. (2021). Inorganic arsenic toxicity and alleviation strategies in rice. *Journal of Hazardous Materials*, *408*, 124751.
Moulick, D., Samanta, S., Sarkar, S., Mukherjee, A., Pattnaik, B. K., Saha, S., ...& Santra, S. C. (2021). Arsenic contamination, impact and mitigation strategies in rice agro-environment: An inclusive insight. *Science of The Total Environment*, *800*, 149477.
Mousavi, S. R., Galavi, M., & Rezaei, M. (2012). The interaction of zinc with other elements in plants: a review. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, *4*(24), 1881-1884.
Murphy, T., Irvine, K., Phan, K., Lean, D., & Wilson, K. (2019). Environmental and health implications of the correlation between arsenic and zinc levels in rice from an arsenic-rich zone in Cambodia. *Journal of Health and Pollution*, *9*(22).
National Research Council (2001) Arsenic in drinking water – 2001 update. National Academy Press, Washington, D.C., 2001
Niazi, N. K., Hussain, M. M., Bibi, I., Shahid, M., Ali, F., Iqbal, J., ...& Rinklebe, J. (2022). The significance of eighteen rice genotypes on arsenic accumulation, physiological response and potential health risk. *Science of The Total Environment*, *832*, 155004.
Panaullah, G. M., Alam, T., Hossain, M. B., Loeppert, R. H., Lauren, J. G., Meisner, C. A., ... & Duxbury, J. M. (2009). Arsenic toxicity to rice (*Oryza sativa* L.) in Bangladesh. *Plant and Soil*, *317*(1), 31-39.
Rahman, K. M., Chowdhury, M. A. K., Sharmeen, F., Sarkar, A., Hye, M. A., & Biswas, G. C. (2011). Effect of zinc and phosphorus on yield of *Oryza sativa* (cv. br-11). *Bangladesh Res. Pub. J*, *5*(4), 315-358.
Rahman, M. M., Sengupta, M. K., Chowdhury, U. K., Lodh, D., Das, B., Ahamed, S., ...& Chakraborti, D. (2006). *Arsenic Contamination Incidents Around the World* (Doctoral dissertation, Csiro Publishing).
Rehman, H. U., Aziz, T., Farooq, M., Wakeel, A., & Rengel, Z. (2012). Zinc nutrition in rice production systems: a review. *Plant and Soil*, *361*(1), 203-226.
Sanchary, I. J., & Huq, S. M. I. (2017). Remediation of arsenic toxicity in the soil-plant system by using zinc fertilizers. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, *6*(01), 30.
Shivay, Y. S., Prasad, R., Singh, R. K., & Pal, M. (2015). Relative efficiency of zinc-coated urea and soil and foliar application of zinc sulphate on yield, nitrogen, phosphorus, potassium, zinc and iron biofortification in grains and uptake by basmati rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural Science*, *7*(2), 161.
Shivay, Y.S., Kumar, D. and Prasad, R., 2008. Effect of zinc-enriched urea on productivity, zinc uptake and efficiency of an aromatic rice–wheat cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *81*(3), pp.229-243.
Srivastava, A. K., Pandey, M., Ghate, T., Kumar, V., Upadhyay, M. K., Majumdar, A., ...& Suprasanna, P. (2021). Chemical intervention for enhancing growth and reducing grain arsenic accumulation in rice.

Environmental Pollution, *276*, 116719.
Stroud, J. L., Norton, G. J., Islam, M. R., Dasgupta, T., White, R. P., Price, A. H., ...& Zhao, F. J. (2011). The dynamics of arsenic in four paddy fields in the Bengal delta. *Environmental Pollution*, *159*(4), 947-953.
Su, Y. H., McGrath, S. P., & Zhao, F. J. (2010). Rice is more efficient in arsenite uptake and translocation than wheat and barley. *Plant and Soil*, *328*(1), 27-34.
Teale, W.D., Paponov, I.A. and Palme, K. (2007). Auxin in action: signalling, transport and the control of plant growth and development. *Nature reviews Molecular cell biology*, *7*(11), pp.847-859.
Williams, P. N., Price, A. H., Raab, A., Hossain, S. A., Feldmann, J., & Meharg, A. A. (2005). Variation in arsenic speciation and concentration in paddy rice related to dietary exposure. *Environmental Science &Technology*, *39*(15), 5531-5540.
Williams, P. N., Raab, A., Feldmann, J., & Meharg, A. A. (2007). Market basket survey shows elevated levels of As in South Central US processed rice compared to California: consequences for human dietary exposure. *Environmental Science &Technology*, *41*(7), 2178-2183.
World Health Organization (2004) IARC, Working Group on some drinking water disinfectants and contaminants, including arsenic, vol 84. Lyon.
Wu, F., Fang, Q., Yan, S., Pan, L., Tang, X., & Ye, W. (2020). Effects of zinc oxide nanoparticles on arsenic stress in rice (Oryza sativa L.): germination, early growth, and arsenic uptake. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(21), 26974-26981.
Xu, X. Y., McGrath, S. P., Meharg, A. A., & Zhao, F. J. (2008). Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation. *Environmental Science &Technology*, *42*(15), 5574-5579.
Yan, S., Wu, F., Zhou, S., Yang, J., Tang, X., & Ye, W. (2021). Zinc oxide nanoparticles alleviate the arsenic toxicity and decrease the accumulation of arsenic in rice (Oryza sativa L.). *BMC plant biology*, *21*(1), 1-11.
Yoshida, S. and Benta, W.H. (1983). Potential productivity of field crops under different environments. *IRRI, Los Banos, Philippines*.
Yousefi, M., & Zandi, P. (2012). Effect of foliar application of zinc and manganese on yield of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) under two irrigation patterns. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Series Agronomy*, *15*(4), 1-9.
Zhao, F. J., Ma, J. F., Meharg, A. A., & McGrath, S. P. (2009). Arsenic uptake and metabolism in plants. *New Phytologist*, *181*(4), 777-794.
Zhao, F. J., Stroud, J. L., Khan, M., & McGrath, S. P. (2012). Arsenic translocation in rice investigated using radioactive 73As tracer. *Plant and Soil*, *350*(1), 413-420.