مقاله پژوهشی

تأثیر تلقیح با قارچ میکوریزا بر رشد و جذب عناصر فلزات سنگین در دو رقم گندم (*Tirticum aestivum* L.) تحت تنش همزمان شوری و فلزات سنگین

فیروزه فیاض[۱]، مرتضی زاهدی[۱*] و سعید ترکش اصفهانی[۲]

[۱] گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۲] گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵)

چکیده

شوری خاک و انتشار مواد شیمیایی بالقوه سمی به محیط‌زیست از طریق فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی از عوامل کاهش‌دهنده تولید گیاهان زراعی است و تخفیف اثر آنها راهکار مناسبی جهت حفظ عملکرد این محصولات و سلامت انسان و محیط‌زیست به‌شمار می‌رود. بر این اساس، این آزمایش گلدانی با هدف بررسی اثر همزیستی با قارچ میکوریزا بر رشد و جذب عناصر سنگین در ارقام گندم نان (روشن و بهار) تحت تنش شوری در یک خاک آلوده به فلزات سنگین، به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل شوری آب آبیاری در سه سطح (صفر، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار سدیم کلرید) و تلقیح گیاه در سه سطح (عدم‌تلقیح و تلقیح با هر یک از دو گونه قارچ میکوریزا شامل *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices*) بودند. تنش شوری موجب کاهش وزن خشک و افزایش غلظت کادمیم، سرب و روی اندام هوایی و ریشه در هر دو رقم مورد مطالعه شد. میزان افزایش غلظت کادمیم و نیز میزان کاهش رشد اندام هوایی و ریشه در اثر شوری، در رقم روشن نسبت به رقم بهار کمتر بود. در هر دو شرایط شور و غیرشور در اثر تلقیح گیاهان با گونه‌های قارچ‌های *F. mosseae* و *Rh. intraradices* وزن خشک اندام هوایی و ریشه در هر دو رقم مورد مطالعه افزایش یافت ولی میزان این افزایش در رقم روشن بیشتر بود. به‌علاوه، تلقیح با قارچ میکوریزا موجب کاهش غلظت کادمیم و سرب در گیاه گردید ولی میزان این کاهش بسته به گونه قارچ، سطح شوری و رقم گندم متفاوت بود. نتایج این آزمایش نشان داد که درحالی‌که تنش شوری رشد گیاه را کاهش داده و موجب افزایش تجمع عناصر سنگین در آن می‌گردد، تلقیح با قارچ میکوریزا بهبود رشد و کاهش غلظت این عناصر در گیاهان گندم را به‌همراه دارد.

کلمات کلیدی: عناصر سنگین، ارقام گندم، *Funneliformis mosseae*، *Rhizophagus intraradices*

مقدمه

گندم در بین گیاهان زراعی با داشتن بیشترین سطح زیرکشت و تولید مهم‌ترین تأمین‌کننده نیاز غذایی جمعیت جهان محسوب می‌شود. امروزه تنش‌های محیطی از عوامل با اهمیت کاهش‌دهنده عملکرد و تولید گیاهان زراعی به‌شمار می‌روند. شوری خاک از جمله تنش‌های محیطی است که به‌عنوان یک مشکل عمده به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطرح است (Mahajan and Tuteja, 2005). انتشار مواد شیمیایی

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: mzahedi@cc.iut.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

بالقوه سمی از جمله فلزات سنگین به محیط‌زیست نیز تبدیل به یک نگرانی عمده برای سلامت انسان و محیط‌زیست شده است. فلزات سنگین از سنگ‌های بستر، مواد معدنی فلزی، عملیات کشاورزی از جمله کوددهی، استخراج معادن و تولید انرژی به محیط‌زیست منتقل می‌شوند (Gao and Zhu, 2005). مطالعات نشان داده که کادمیم به‌عنوان یک فلز سنگین و غیرضروری، عامل ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی متعددی در گیاهان است (Shahabivand *et al.*, 2012). با افزایش سطح کادمیم از یک حد بحرانی در داخل خاک، کیفیت محصولات زراعی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و عملکرد آنها کاهش پیدا می‌کند (Farid *et al.*, 2013). جذب کادمیم در گندم بسته به نوع خاک، آلودگی اتمسفر و ارقام گندم متفاوت است (Liu *et al.*, 2015). Shafi و همکاران (۲۰۰۹) تحت تنش کادمیم، بسیاری از اختلالات فیزیولوژیکی مانند کاهش فتوسنتز، قندها و پروتئین‌های محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را در قسمت‌های هوایی گندم مشاهده کردند که منجر به کاهش رشد گیاه، بیوماس و عملکرد دانه شد. Dahlin و همکاران (۲۰۱٦) گزارش دادند که یون کلرید حاصل از شوری می‌تواند باعث افزایش تحرک کادمیم در خاک شده و جذب آن را توسط گندم به‌ویژه از طریق متحرک‌کردن کادمیم طبیعی خاک افزایش دهد (Dahlin *et al.*, 2016).

در گذشته گزارش‌های متناقضی در تأیید اثرات سینرژیک و آنتاگونیستی عناصر روی و کادمیم بر یکدیگر ارائه شده است، اما نتایج یک مطالعه مهم حاکی است که به‌دلیل شباهت در ویژگی‌های شیمیایی و عملکرد متابولیکی این دو عنصر، تجمع روی سبب کاهش جذب کادمیم توسط گیاه می‌شود (Salah and Barrington, 2006). غلظت سرب نیز در خاک‌های کشاورزی به سرعت در بسیاری از نقاط جهان افزایش یافته است. جذب، انتقال و تجمع سرب توسط گیاهان به شدت توسط خاک و عوامل گیاهی کنترل می‌شود و در بین گونه‌های گیاهی تفاوت قابل توجهی از این نظر وجود دارد (Liu *et al.*, 2003).

قارچ آربوسکولار میکوریزا (AMF) از انواع شناخته‌شده قارچ‌های میکوریزا هستند که در اثر همزیستی با گیاهان باعث افزایش رشد و افزایش تحمل آنها به آلودگی‌های آلی، فلزات سمی و تنش‌های محیطی می‌شوند. این قارچ‌ها با بیش از ۹۰ درصد از گیاهان آوندی و بیش از ۸۰ درصد از تمام گیاهان خشکی‌زی رابطه همزیستی دارند (Dalpe, 2003). مطالعات متعدد نشان داده است که در اغلب موارد، همزیستی گیاه با این قارچ‌ها در شرایط شور باعث افزایش جذب مواد مغذی، انباشت ترکیبات اسمزی و افزایش میزان فتوسنتز و کارآیی مصرف آب در گیاه می‌شود. این عوامل می‌تواند موجب تعدیل اثرات مخرب تنش شوری بر گیاهان از طریق ترکیبی از اثرات مثبت تغذیه‌ای، بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مولکولی ناشی از همزیستی شود. میزان این تأثیر مثبت بر رشد گیاه به گونه قارچ نیز بستگی دارد (Porcel *et al.*, 2012). این قارچ‌ها می‌توانند علاوه بر افزایش جذب منیزیم در شرایط شور، عوارض جانبی سدیم بر فتوسنتز را نیز کاهش دهند. تنظیم نسبت K^+/Na^{2+} یکی دیگر از اثرات مثبت قارچ‌های میکوریزا بر رشد گیاه در شرایط شور است که در اثر افزایش جذب پتاسیم اتفاق می‌افتد (Daei *et al.*, 2009). علاوه بر این، قارچ‌های میکوریزا می‌توانند باعث افزایش حلالیت فسفر در خاک شوند و از این طریق، دسترسی زیستی گیاه به فسفر را افزایش دهند (Miransari, 2010). در مورد تنش آلودگی به فلزات سنگین نیز مانند تنش‌های دیگر از قبیل خشکی و شوری، مشخص شده است که با افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک، اثر تعدیل‌کنندگی قارچ بر رشد گیاه نیز بیشتر می‌شود. چنانچه در مطالعه Upadhyay و همکاران (۲۰۱۲) همزیستی با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا به خصوص گونه *Rhizophagus intraradices*، باعث افزایش تحمل گیاهان گوجه‌فرنگی، ذرت و شبدر نسبت به فلزات سنگین گردید.

عناصر سنگین می‌توانند پس از جذب توسط گیاه در دانه‌های گندم تجمع یافته و از طریق زنجیره غذایی به انسان منتقل شوند. بنابراین کاهش جذب و تجمع این عناصر در گیاه گندم، یکی از مسائل مهم برای نیل به اهداف کشاورزی پایدار و سلامت انسان است. ساز و کار تحمل گندم به عناصر سنگین

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

به‌طور عمده شامل عدم‌جذب در سطح ریشه، اصلاح الگوی توزیع عناصر در بخش‌های مختلف گیاه، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، افزایش تولید تنظیم‌کننده‌های رشد، ایجاد تعادل یونی، تولید پروتئین‌های مسئول مقابله با تنش و فعال‌کردن ژن‌های عامل افزایش تحمل است. با این حال، این ساز و کارها با ارقام، شرایط رشد، مرحله رشد و مدت زمان تنش به کار رفته متفاوت است (Rizwan *et al.*, 2016). لذا هدف این مطالعه ارزیابی تأثیر همزیستی با قارچ‌های میکوریزا بر رشد گیاه و توزیع عناصر کادمیم، سرب و روی در اندام‌های مختلف گیاه به‌خصوص انتقال آنها به دانه‌ها که از نظر امنیت غذایی اهمیت زیادی دارند، است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در فضای باز مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. در این تحقیق تأثیر اعمال شوری سدیم کلرید در آب آبیاری در سه سطح صفر (شاهد)، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار سدیم کلرید (سطوح شوری معادل ۱/۸، ٦/۸ و ۱۳/۷ دسی‌زیمنس بر متر) که براساس گزارش تحقیقات قبلی بر روی ارقام مورد نظر به تنش شوری تعیین شده بود و همچنین تأثیر سه سطح تلقیح گیاهان شامل عدم‌تلقیح یا شاهد، تلقیح با گونه‌های قارچ میکوریزا *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* به‌طور مجزا بر ارقام گندم نان مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی واکنش ارقام مختلف گندم به شوری در جذب عناصر سنگین، ارقام روشن و بهار که براساس خصوصیات معرفی ارقام و نتایج مطالعات قبلی به‌ترتیب به‌عنوان مقاوم و حساس به شوری گزارش شده بودند، انتخاب شدند. در ابتدای آزمایش برای سبزشدن یکنواخت تا مرحله دو تا سه برگی و تا استقرار کامل گیاه، گلدان‌ها با آب معمولی آبیاری شدند و پس از استقرار گیاهان تیمارهای شوری در طول دوره رشد اعمال گردید. آبیاری گلدان‌ها پس از تخلیه ٤۰ درصد آب قابل‌استفاده در خاک در تیمار شاهد و با در نظرگرفتن ۱۵ درصد آبشویی انجام شد (Ayers and Wescot, 1985).

آماده‌سازی خاک و اعمال تیمارها: خاک مورد آزمایش از بخش نکاشت یک مزرعه آلوده به کادمیم، سرب و روی از منطقه معدن باما در استان اصفهان که در مطالعات قبلی، آلودگی آن به فلزات سنگین گزارش شده بود (Safari Sinegani *et al.*, 2009)، تهیه شد. قبل از اجرای آزمایش به منظور آماده‌کردن و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (جدول ۱)، نمونه خاک تهیه و پس از خردکردن کلوخه‌ها از الک ۲ میلی‌متری گذرانده شد. برای حذف میکروارگانیسم‌های موجود در خاک، ابتدا خاک هوا خشک شده و سپس در دستگاه اتوکلاو توسط بخارآب ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت یک ساعت ضدعفونی شد. پس از کاشت بذور و سبزشدن گیاهچه‌ها تا مرحله دو تا سه برگی، گیاهچه‌های اضافی حذف شد تا تعداد نهایی بوته‌های موجود در هر گلدان به پنج عدد برسد. برای تلقیح قارچ از روش آغشته‌کردن خاک گلدان‌ها در تیمارهای مورد نظر با زادمایه قارچی میکوریزایی (شامل اسپور و ریسه قارچ و قطعات ریشه مورد استفاده برای کلونیزه‌شدن قارچ) به میزان ۱۰ گرم زادمایه به‌ازای هر کیلوگرم خاک گلدان استفاده شد. ازتوباکتر در ظروف پتری بر روی یک محیط اصلاح‌شده وینوگرادسکی کشت شد (Garrity *et al.*, 2005). در این روش برای تلقیح باکتری پس از کشت باکتری در محیط سوسپانسیون، به‌ازاء هر ۱۰ گرم بذر، میزان ۱۰ میلی‌لیتر از سوسپانسیون باکتری، که حاوی 10^8 سلول باکتری بود، به‌مدت نیم ساعت با بذور هم زده شد و پس از خشک‌شدن آنها در شرایط استریل، کاشت انجام گرفت. برای سبزشدن یکنواخت تا مرحله دو تا سه برگی و تا استقرار کامل گیاه از آب معمولی برای آبیاری استفاده شد و پس از آن گیاهان شاهد با آب غیرشور و گیاهان تحت تنش با آب شور حاوی ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار سدیم کلرید آبیاری شدند.

اندازه‌گیری صفات: برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و ریشه در زمان گلدهی و پس از سه ماه از زمان کاشت و ۷۰ روز اعمال تنش شوری، هر گلدان به‌عنوان یک تکرار در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

جدول ۱- مقادیر مربوط به اسیدیته، هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کادمیم، سرب و روی کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کادمیم، سرب و روی قابل عصاره‌گیری با EDPA در نمونه خاک مورد استفاده

pH	EC	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کادمیم کل	کادمیم*	سرب کل	سرب*	روی کل	روی*
۸/۰۱	۲/۲	٤۳٥	۱٦/۸	۱۳۱/۲	۹/۰۰	۱/۲	۲٥۹/٥	٥۹/۷	۱۱٦٦/٤	۸٥

*** قابل عصاره‌گیری با EDPA**

نظر گرفته شد. پس از برداشت سه بوته در هر گلدان، نمونه‌های گیاهی به‌مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ٦٥ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس با ترازوی دقیق توزین شدند.

برای اندازه‌گیری غلظت کادمیم، سرب و روی در گیاه از روش هضم تر با اسید استفاده شد. در این روش ۰/٥ گرم ماده خشک گیاهی و ٤ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ داخل لوله هضم به‌مدت ۲٤ ساعت قرار گرفت. لوله‌ها بعد از قرارگرفتن داخل بلوک هضم، به‌مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰ درجه حرارت داده شد. سپس ٤ میلی‌لیتر هیدروژن پراکسید تا زمان بی‌رنگ شدن محلول اضافه شد. محلول از کاغذ صافی عبور داده شد و با آب‌مقطر به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسید. در آخر غلظت عناصر سنگین عصاره به‌دست آمده با دستگاه جذب اتمی شعله‌ای خوانده شد. قابل ذکر است که مقدار عنصر نمونه‌ها براساس منحنی‌های استاندارد رسم‌شده تعیین شد.

برای اندازه‌گیری غلظت عناصر سدیم و پتاسیم در گیاه از روش هضم خشک استفاده شد. به این ترتیب که مقدار ۰/۲ گرم نمونه‌های خشک و پودرشده در کروزه‌های چینی در داخل کوره الکتریکی قرار گرفت. کروزه‌های حاوی نمونه به‌مدت پنج ساعت در دمای ٥٥۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا مواد گیاهی به‌طور کامل به خاکستر تبدیل شود. بعد از خنک‌شدن کروزه‌ها، ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال به آنها اضافه شد. سپس با حرارت‌دادن ملایم کروزه‌ها روی هیتر مواد خاکسترشده در اسید حل شدند، سپس محلول را از قیف و کاغذ صافی عبور داده و عصاره به‌دست آمده با آب‌مقطر به حجم نهایی ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. برای اندازه‌گیری غلظت سدیم و پتاسیم از دستگاه شعله‌سنج (مدل ٤۱۰) استفاده و براساس منحنی‌های استاندارد رسم‌شده، مقدار سدیم و پتاسیم نمونه‌ها تعیین شد.

اندازه‌گیری فسفر جذب‌شده توسط گیاه به روش اولسن (۱۹٥٤) (Olsen, 1954) انجام شد. در این روش پس از هضم خشک نمونه‌ها، فسفر استخراج‌شده به‌وسیله مولیبدات آمونیوم و تارتارات آنتیموان پتاسیم به‌صورت کمپلکس آنتیموان فسفومولیبدات در آمده که پس از احیاشدن توسط اسید آسکوربیک تولید رنگ آبی می‌نماید. شدت رنگ آبی تولیدشده رابطه مستقیمی با غلظت فسفر موجود در عصاره دارد. شدت این رنگ توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل HITACHI u-1800 در طول‌موج ۸۷٥ نانومتر با استفاده از محلول‌های استاندارد فسفر اندازه‌گیری شد.

$$Avail\text{-}p = pr\ (Vf/Vs) / (Ve/W) \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

Avail-p فسفر قابل‌استفاده (میلی‌گرم در کیلوگرم)، Pr غلظت فسفر خوانده‌شده توسط دستگاه (میلی‌گرم در لیتر)، Vs حجم عصاره مصرفی (میلی‌لیتر)، Ve حجم محلول استخراجی (میلی‌لیتر)، Vf حجم نهایی (میلی‌لیتر)، W وزن گیاه خشک (گرم)

محاسبات آماری به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و تجزیه داده‌ها برای صفات مختلف با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/٤ انجام گرفت. به‌منظور بیان تفاوت‌های آماری در بین میانگین صفات اندازه‌گیری‌شده، در صورت معنی‌دارشدن اثر عوامل آزمایشی، از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LST) در سطح احتمال ٥ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه: اثرات اصلی شوری، رقم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر عوامل آزمایشی بر وزن خشک و غلظت عناصر کادمیم، سرب، روی، فسفر و نسبت غلظت پتاسیم به سدیم در اندام هوایی و ریشه گندم

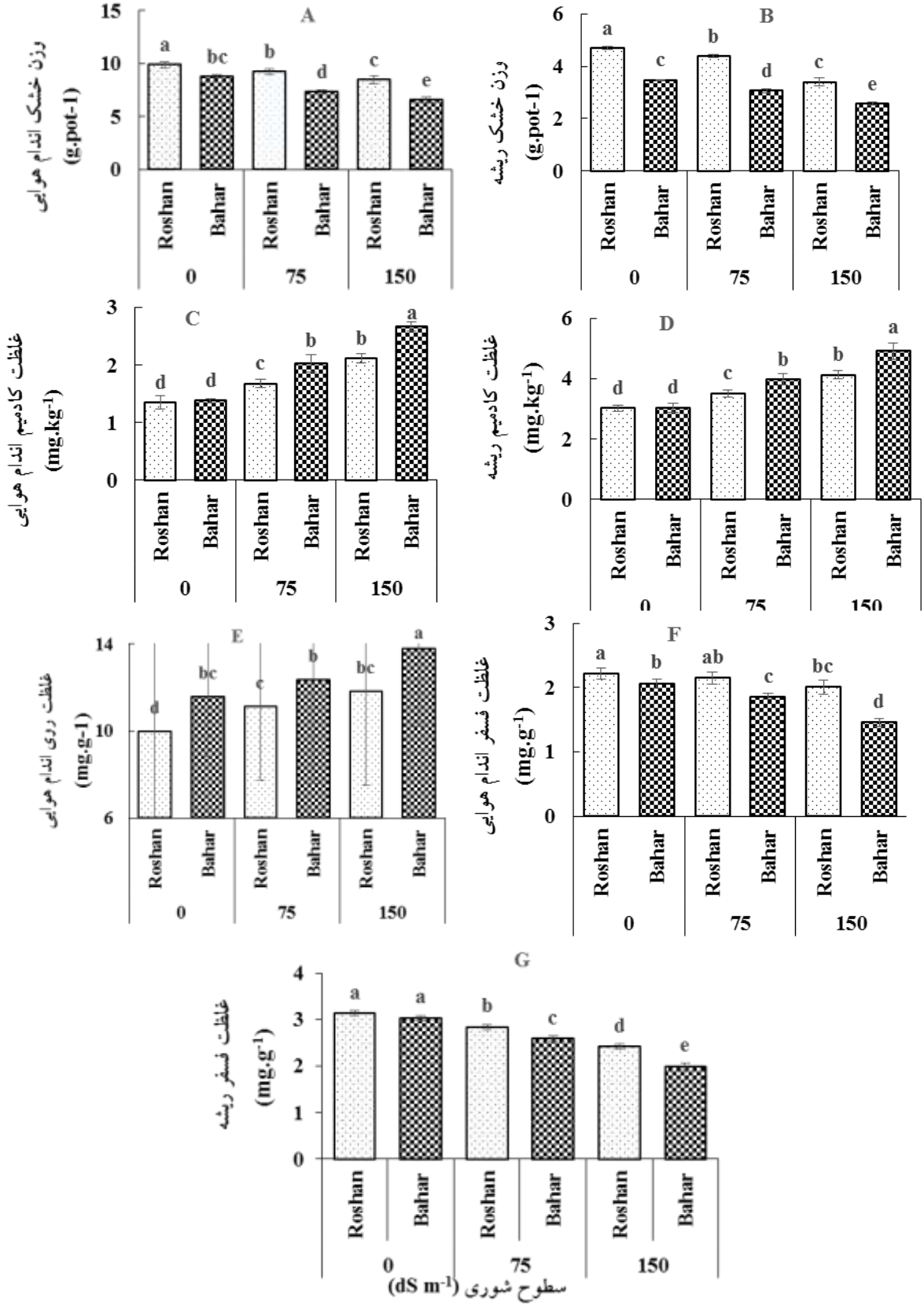
منابع تغییر	شوری (A)	رقم (B)	تلقیح (C)	(B) × (A)	(C) × (A)	(C) × (B)	(C) ×(B) ×(A)	خطا
درجه آزادی	۲	۱	۲	۲	٤	۲	٤	۳٦
وزن خشک اندام هوایی	۱۵/۰٦**	۳۵/۹۰**	۹/۵٤**	۰/۹۱۲*	۰/۱۸۳^{ns}	۱/۳۱**	۰/۰۱٤^{ns}	۰/۲٦۱
وزن خشک ریشه	۵/۵٦**	۱٦/۹٦**	۰/۳۷٦**	۰/۳۰۹**	۰/۰۵۰^{ns}	۰/۰۷۵^{ns}	۰/۰۲۳^{ns}	۰/۰٤۰
غلظت کادمیم اندام هوایی	٤/۸۱**	۱/۳۰**	۰/۷۸۵**	۰/۳۰۷**	۰/۱۱۳*	۰/۰۹۰^{ns}	۰/۰۷۵^{ns}	۰/۰۳۸
غلظت کادمیم ریشه	۱۰/۲۰**	۲/۳۱**	۲/٤٦**	۰/۷۰۵*	۰/۰۵۰^{ns}	۰/۰۸۵^{ns}	۰/۰۰۰۸^{ns}	۰/۲۰۰
غلظت سرب اندام هوایی	۱۸/٦۳**	۳٤/٦٦**	۳٦/۱۹**	۰/۵۸٦^{ns}	۰/۲۱۲^{ns}	٤/۱۱**	۰/۷٦۱^{ns}	۰/۸۸۵
غلظت سرب ریشه	۰/٤٦٤**	۲۰۵/۷۲**	٤٦۲/۹۵**	۳۱/۵۲^{ns}	۲۸/۲۱^{ns}	۲۵/۰۲^{ns}	۱٦/٤۵^{ns}	۳٤/۱۷
غلظت روی اندام هوایی	٤٤۰۸/۸۵**	۱۰۹۹/۸۱**	۱۹۷۹/۸٤**	۷۲۰/۱۳**	۱۵۰/۷٤^{ns}	۱۲۷/۱۳^{ns}	۱۷۲/۱٦^{ns}	۷۷/۰٤
غلظت روی ریشه	۱۹۵۱٤/۰۵**	۲۰٦۵/۸۵*	۵۰۸۲/۳۹**	۷۵٤/۸۰^{ns}	۵۱٤/۱۹^{ns}	٤٤۱۲/۵۷**	۱۰۷۳/۷۷*	٤۲۷/٦۱
غلظت فسفر اندام هوایی	۰/۷۹۹**	۱/٤٤**	۰/۸۰٤**	۰/۱۹٤**	۰/۰۱۲ ^{ns}	۰/۱٦۷**	۰/۰۳۳ ^{ns}	۰/۰۲۱
غلظت فسفر ریشه	۳/۵۳**	۰/۹۰۷**	۰/۳۰۵**	۰/۱۱۷**	۰/۰۵۲*	۰/۰۰٦ ^{ns}	۰/۰۰٦^{ns}	۰/۰۱۹
نسبت غلظت پتاسیم به سدیم اندام هوایی	۳٦۵/۱۵**	۳۰۱/۸٤**	۱۰۷/۷۸**	۲/۵۰ ^{ns}	۳/۳۳ ^{ns}	۰/۲۸٤ ^{ns}	۹/۰٦*	۳/۳۵
نسبت غلظت پتاسیم به سدیم ریشه	۲/۳۸**	۳۸/۷٦**	۱/۵۱**	۰/۰۵۲ ^{ns}	۰/۰۱۱ ^{ns}	۰/۰۲٤ ^{ns}	۰/۰۱۱ ^{ns}	۰/۱٤۹

ns عدم‌معنی‌دار، * و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

و تیمار تلقیح بر غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد و تأثیر برهمکنش شوری و رقم و شوری و تیمار تلقیح بر غلظت کادمیم اندام هوایی به‌ترتیب در سطوح احتمال یک و پنج درصد و تأثیر برهمکنش شوری و رقم بر غلظت کادمیم ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش شوری موجب افزایش غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه در هر دو رقم مورد مطالعه گردید (شکل 1C و 1D).

در سطوح شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار میزان افزایش غلظت کادمیم اندام هوایی در رقم حساس بهار به‌ترتیب برابر ٤٦ و ۹۳ درصد و در رقم مقاوم روشن ۲٤ و ۵۷ درصد بود. این مقادیر افزایشی برای غلظت کادمیم در ریشه رقم بهار به‌ترتیب ۳۲ و ٦۳ درصد و رقم روشن ۱۷ و ۳۷ درصد بود. Muhling و Lauchli (۲۰۰۳) با بررسی الگوی جذب و توزیع کاتیون‌ها، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و پروتئین‌ها در برگ‌های ارقام حساس و مقاوم گندم بیان کردند که تنش شوری باعث افزایش غلظت کادمیم در برگ‌های ژنوتیپ‌های حساس به شوری می‌شود که آن را نشان‌دهنده افزایش نفوذپذیری غشای پلاسمایی در این ژنوتیپ‌ها در شرایط مواجهه همزمان با تنش‌های شوری و کادمیم دانستند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که

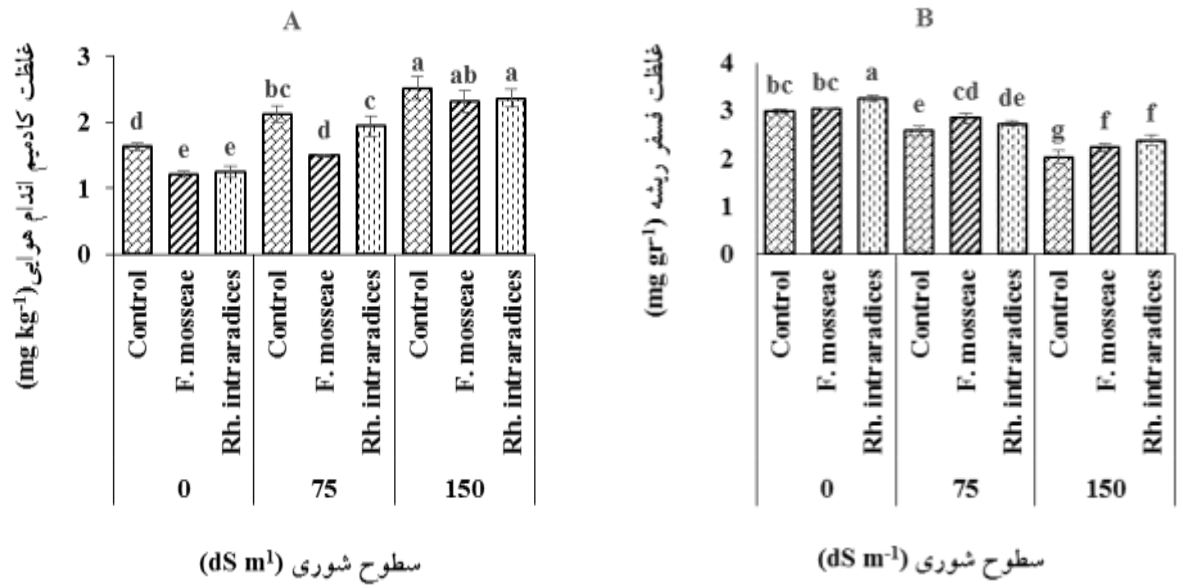
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]



شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات برهمکنش دوگانه شوری و رقم بر وزن خشک اندام هوایی (A)، وزن خشک ریشه (B)، غلظت کادمیم اندام هوایی (C) و ریشه (D)، غلظت روی اندام هوایی (E)، غلظت فسفر اندام هوایی (F) و ریشه (G)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]



شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات برهمکنش دو گانه شوری و تیمار تلقیح بر غلظت کادمیم اندام هوایی (A) و غلظت فسفر ریشه (B)

تأثیر شوری بر تجمع کادمیم توسط گونه‌های مختلف، صرف نظر از بیش انباشتگر یا غیرانباشتگربودن آنها به‌طور عمده به تحمل شوری و تحمل به کادمیم آنها مربوط می‌شود (Zhang *et al.*, 2016). در ارقام متحمل، پس از جذب از ریشه، غلظت بالایی از کادمیم در ریشه انباشته می‌شود و مقدار کمتری بسته به ارقام گندم به اندام هوایی انتقال می‌یابد (Shahabivand *et al.*, 2017). نگهداری کادمیم بیشتر در ریشه ممکن است به‌علت کلاته‌شدن با اسیدهای ارگانیک باشد (Adeniji *et al.*, 2010). با این حال، Hart و همکاران (۲۰۰۶) گزارش دادند که فیتوکلایتین‌ها ممکن است عامل محدودکننده‌ای برای ذخیره متغیر کادمیم در ریشه‌های گندم نباشد (Hart *et al.*, 2006).

تلقیح گیاهان با دو گونه قارچ *Rh. intraradices* و *F. mosseae* در شرایط غیرشور موجب کاهش غلظت کادمیم اندام هوایی گردید (شکل ۲A). با این حال، در سطح شوری ۷۵ میلی‌مولار فقط تلقیح گیاهان با گونه قارچ *F. mosseae* موجب کاهش معنی‌دار غلظت کادمیم شد، ولی تأثیر تلقیح گیاهان با گونه قارچ *Rh. intraradices* از این نظر معنی‌دار نبود. در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری بین گیاهان تلقیح‌شده با میکوریزا و گیاهان تلقیح‌نشده از نظر غلظت کادمیم اندام هوایی مشاهده نشد. برخی مطالعات نشان داده است که قارچ میکوریزا با آزادکردن هیدروکسیل باعث کاهش قابلیت دسترسی زیستی کادمیم در شرایط تنش شوری می‌شود (Li *et al.*, 2016). در مطالعه Fu و همکاران (۲۰۱۱) گزارش شده است که تشکیل کمپلکس غیرسمی کادمیم با برخی از مواد قطبی خاص، مانند هیدروکسیل یا کربوکسیل منجر به کاهش سمیت آن شده است (Fu *et al.*, 2011).

غلظت سرب اندام هوایی و ریشه: اثرات اصلی شوری، رقم و تیمار تلقیح بر غلظت سرب اندام هوایی و ریشه و تأثیر برهمکنش رقم و تیمار تلقیح بر غلظت سرب اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). در سطوح شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار سدیم کلرید در مقایسه با شاهد غیرشور، غلظت سرب در اندام هوایی به‌ترتیب ۱۲ و ۲۵ درصد و غلظت سرب در ریشه ۱۲ و ۱۶ درصد افزایش یافت (جدول ۳). افزایش تحرک فلزات و حلالیت آنها در شرایط شور غالباً در اثر تشکیل کمپلکس‌های فلزی با لیگاندهای معدنی در محلول خاک یا رقابت بین یون‌های سدیم و فلز برای مکان‌های تبادلی موجود در خاک است (Zhang *et al.*, 2016). اثر برهمکنش رقم و تیمار تلقیح نشان داد که تلقیح گیاهان هر دو رقم مورد مطالعه با گونه‌های قارچ میکوریزا موجب کاهش غلظت سرب اندام هوایی گردید (شکل ۳B).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

جدول ۳- اثرات اصلی شوری، رقم و تیمار تلقیح بر وزن خشک، غلظت کادمیم، سرب، روی، فسفر و نسبت غلظت پتاسیم به سدیم اندام هوایی و ریشه گندم

منابع تغییر	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	کادمیم اندام هوایی	کادمیم ریشه	سرب اندام هوایی	سرب ریشه
	(g/pot^{-1})		($mg\ kg^{-1}$)			
شوری (mM)						
صفر	۹/۳۳^{a}	٤/۰۸^{a}	۱/۳٦^{c}	۳/۰۲^{c}	۱۰/۷۷^{c}	٥۰/٦٤^{b}
۷٥	۸/۲۹^{b}	۳/۷۳^{b}	۱/۸٦^{b}	۳/۷٥^{b}	۱۱/۷۳^{b}	٥۲/۹۲^{b}
۱٥۰	۷/٥۱^{c}	۳/۰۰^{c}	۲/٤۰^{a}	٤/٥۳^{a}	۱۲/۸۰a	٦۰/۳٥a
رقم						
روشن	۹/۱۹^{a}	٤/۱٦^{a}	۱/۷۲^{b}	۳/٥٦^{b}	۱۰/۹۷^{b}	٥۲/٦۸^{b}
بهار	۷/٥٦^{b}	۳/۰٤^{b}	۲/۰۳^{a}	۳/۹۷^{a}	۱۲/٥۷^{a}	٥۷/۰۰^{a}
تیمار تلقیح						
شاهد	۷/٥٤^{b}	۳/٤۳^{b}	۲/۰۹^{a}	٤/۱۸^{a}	۱۳/٤۰^{a}	٦۰/٤٥^{a}
F. mosseae	۸/۷٦^{a}	۳/٦۹^{a}	۱/٦۷^{c}	۳/٤٦^{b}	۱۰/۸۰^{b}	٥۲/۳٤^{b}
Rh. intraradices	۸/۷٤^{a}	۳/٦۷^{a}	۱/۸٥^{b}	۳/٦٦^{b}	۱۱/۱۱^{b}	٥۱/۱۲^{b}

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

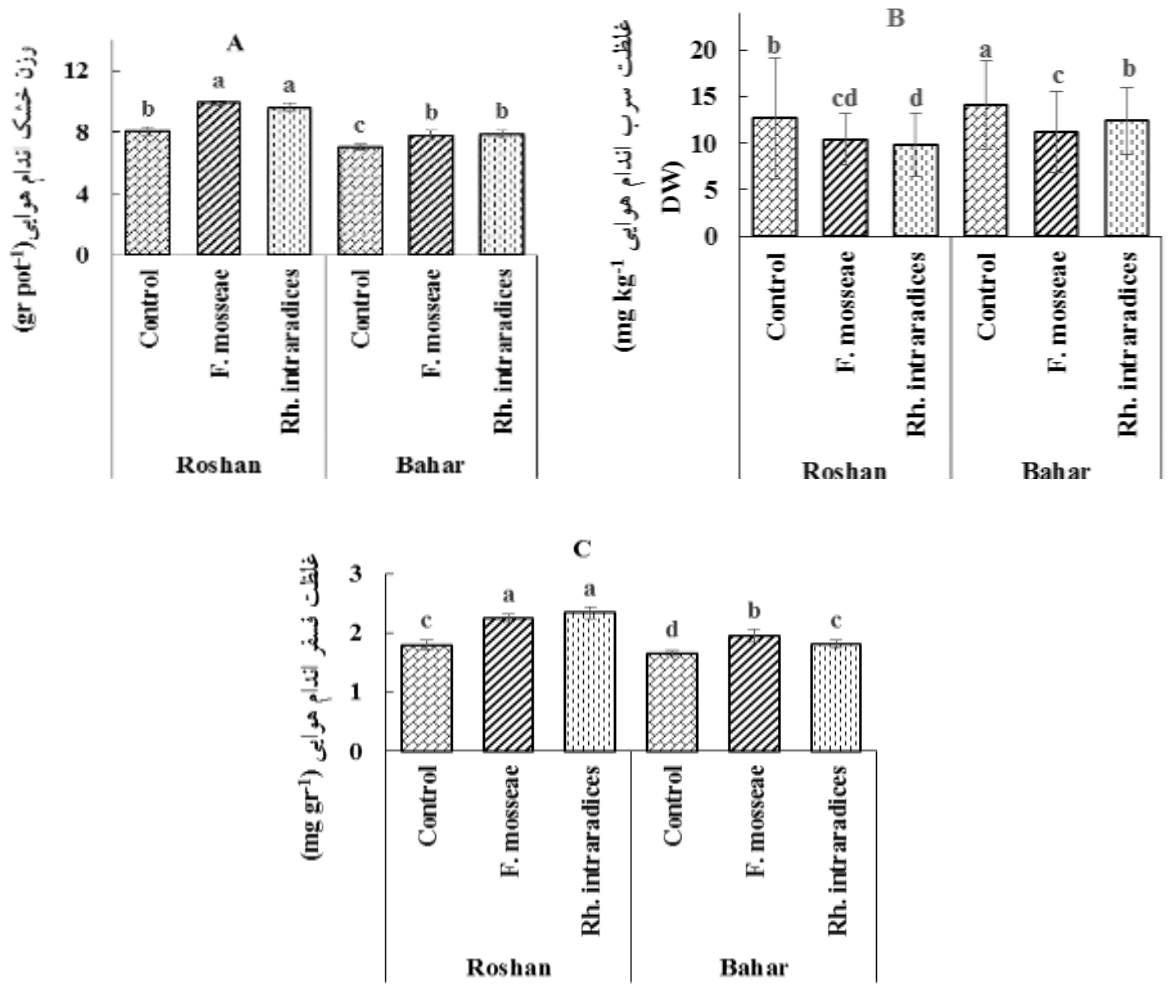
ادامه جدول ۳-

منابع تغییر	روی اندام هوایی	روی ریشه	فسفر اندام هوایی	فسفر ریشه	نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی	نسبت پتاسیم به سدیم ریشه
	($mg\ kg^{-1}$)		($mg\ g^{-1}$)			
شوری (mM)						
صفر	۱۰۹/۲٥^{c}	۱٦۰/٥۰^{c}	۲/۱٥^{a}	۳/۰۹^{a}	۱۷/۹٤^{a}	۳/۱٥^{c}
۷٥	۱۲۳/۱۲^{b}	۱۸٦/۹۰^{b}	۲/۰۲^{b}	۲/۷۱^{b}	۱٤/۲۰^{b}	۳/٥۳^{b}
۱٥۰	۱٤۱/۰۰^{c}	۲۲٥/۹٤^{c}	۱/۷٤^{c}	۲/۲۱^{c}	۸/۹۸^{c}	۳/۸۸^{a}
رقم						
روشن	۱۱۹/۷۷^{b}	۱۸٤/۹۳^{b}	۲/۱۳^{a}	۲/۸۰^{a}	۱٦/۰۷^{a}	٤/۳۷^{a}
بهار	۱۲۸/۸۰^{a}	۱۹۷/۳۰^{a}	۱/۸۰^{b}	۲/٥٤^{b}	۱۱/۳٤^{b}	۲/٦۸^{b}
تیمار تلقیح						
شاهد	۱۳٦/۳۹^{a}	۲۱۰/٥۰^{a}	۱/۷۲^{b}	۲/٥۳^{b}	۱۱/۰۲^{c}	۳/۸٦^{a}
F. mosseae	۱۱۷/۹۲^{b}	۱۸۲/۰٦^{b}	۲/۱۰^{a}	۲/۷۰^{a}	۱٥/۸۱^{a}	۳/۳۳^{b}
Rh. intraradices	۱۱۸/٥٥^{b}	۱۸۰/۷۸^{b}	۲/۰۸^{a}	۲/۷۸^{a}	۱٤/۳۰^{b}	۳/۳۸^{b}

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]



شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات برهمکنش دو گانه رقم و تیمار تلقیح بر وزن خشک (A)، غلظت سرب (B) و فسفر اندام هوایی (C)

میزان کاهش غلظت سرب اندام هوایی در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ‌های *F. mosseae* و *Rh. intraradices* برای رقم روشن به‌ترتیب ۱۸ و ۲۳ درصد و برای رقم بهار به‌ترتیب ۲۱ و ۱۲ درصد به‌دست آمد. مطالعات نشان داده که فاکتورهای گیاهی مانند سطح و عصاره‌های ریشه، میکوریزاسیون و میزان تعرق گیاه، دسترسی سرب در خاک و جذب آن توسط گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین گیاهان مختلف، تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای در فعالیت‌های ریشه و مواد ترشحی دارند که بر حلالیت و دسترسی زیستی به سرب در خاک تأثیر می‌گذارد (Liu *et al*., 2003). تیمارهای تلقیح با قارچ‌های *F. mosseae* و *Rh. intraradices* کمترین غلظت سرب ریشه (به‌ترتیب ۱۳ و ۱۵ درصد) را نسبت به تیمار بدون‌تلقیح نشان دادند (جدول ۳). گزارش‌ها نشان می‌دهند که قارچ‌های آربوسکولار میکوریزا توانایی کاهش جذب عناصر سنگین از طریق تثبیت و کاهش دسترسی و به‌دنبال آن، کاهش اثرات مضر آنها برای گیاهان تلقیح‌شده را دارند (Audet and Charest, 2006).

غلظت روی اندام هوایی و ریشه: اثرات اصلی شوری، رقم و تیمار تلقیح بر غلظت روی در اندام هوایی و ریشه و تأثیر برهمکنش شوری و رقم بر غلظت روی در اندام هوایی و برهمکنش رقم و تیمار و برهمکنش سه گانه شوری، رقم و تیمار بر غلظت روی در ریشه در سطح احتمال یک درصد (اثر رقم و برهمکنش سه گانه شوری، رقم و تیمار بر غلظت روی در ریشه در سطح احتمال ۵ درصد) معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش شوری موجب افزایش غلظت روی در اندام هوایی در هر دو رقم مورد مطالعه گندم گردید (شکل 1E). بیشترین میزان افزایش در سطوح شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار به‌ترتیب ۲۰ و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

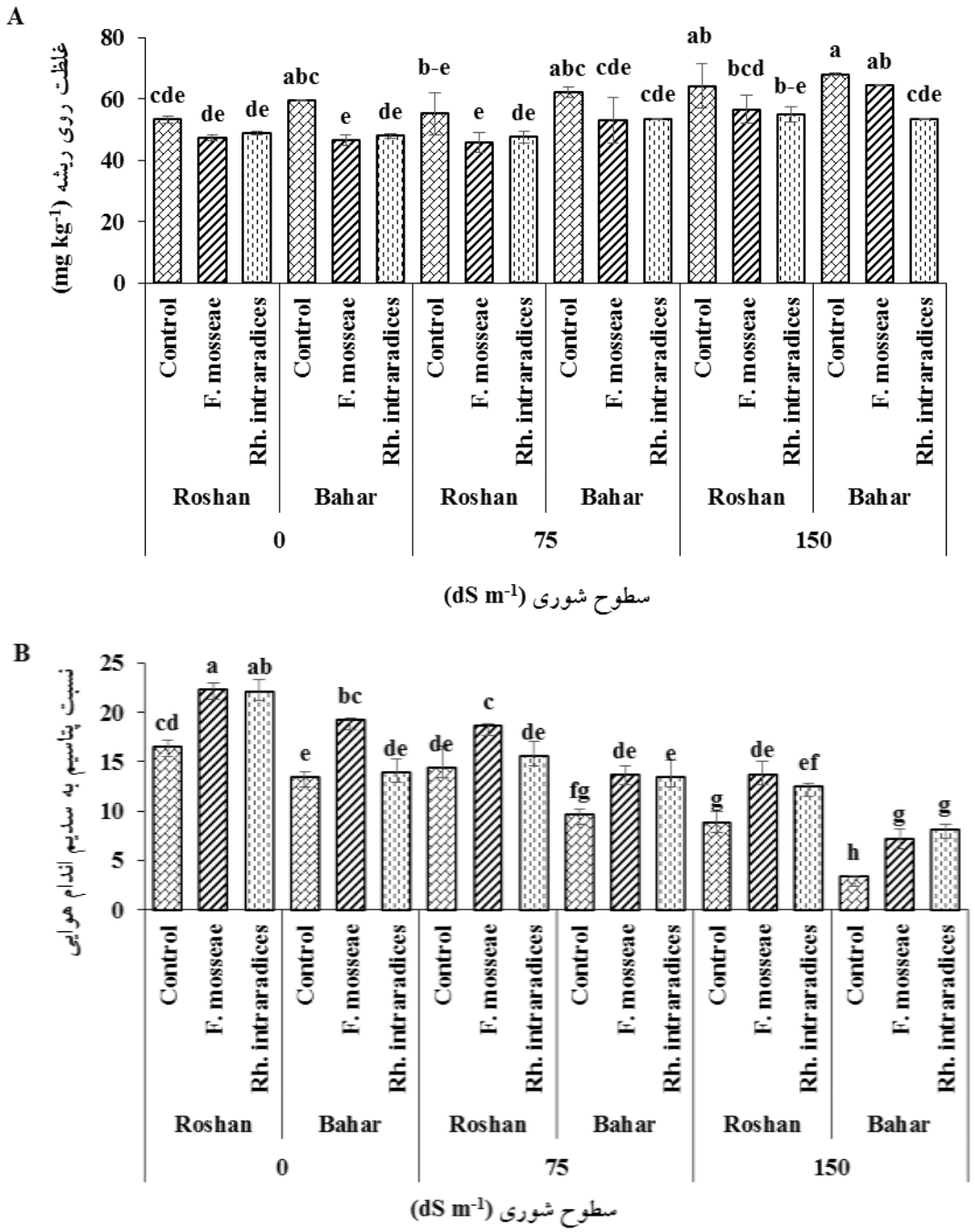
٤١ درصد در رقم حساس بهار و کمترین میزان افزایش به‌ترتیب ۵ و ۱۷ درصد در رقم متحمل روشن مشاهده شد. میزان افزایش غلظت روی ریشه در سطح شوری ۷۵ میلی‌مولار در ارقام روشن و بهار در تیمار بدون‌تلقیح به‌ترتیب ١٦ و ١٦ درصد، در تیمار تلقیح با قارچ *F. mosseae* به‌ترتیب ۱۰ و ۲۷ درصد و در تیمار تلقیح با قارچ *Rh. Intraradices*، به‌ترتیب ۱۲ و ۱۸ درصد و در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار در ارقام روشن و بهار در تیمار بدون‌تلقیح به‌ترتیب ٤٦ و ٤٣ درصد، در تیمار تلقیح با قارچ *F .mosseae* به‌ترتیب ٦٧ و ۳۰ درصد و قارچ *Rh.Intraradices*، به‌ترتیب ٢٦ و ۳۲ درصد بود (شکل ٤A). عناصر سنگین مانند روی در سطح بالا در دیواره‌های سلولی، فضاهای بین سلولی، واکوئل‌ها و دیکتیوزوم‌ها به شکل پیروفسفات روی، رسوبات و کریستال‌ها یافت می‌شوند. بنابراین عنصر روی به‌راحتی به اندام‌های هوایی حرکت نمی‌کند (Liu *et al.*, 2003). در این مطالعه، نیز در خصوصیات جذب و انتقال فلزات سنگین در بین ارقام مختلف تفاوت معنی‌داری وجود داشت. به‌علت خواص شیمیایی مشابه مانند شعاع یونی، کادمیم و روی ممکن است از راه‌های یکسان در داخل گیاهان جذب شوند و از طریق همان مسیر حرکت کنند (Rivelli *et al.*, 2012). از جمله مکانیزم‌های مختلف که توسط قارچ‌های میکوریزا برای سم‌زدایی اثرات نامطلوب فلزات سنگین بکار می‌رود شامل افزایش رشد گیاه و رقیق‌کردن فلزات در بافت‌ها، تولید فیتوکلایتین‌ها مانند اسیدهای آلی توسط ریشه‌های گیاه که مانع جذب فلزات از ریزوسفر توسط کلاته‌کردن، رسوب و اتصال آنها شده، تبادل فلزات سنگین بین قارچ‌ها و گیاهان میزبان، انتقال فعال فلزات توسط مسیرهای خاص از طریق فعال‌شدن حامل‌های خاص یا غیراختصاصی و منافذ غشای پلاسمایی (در قارچ و گیاه میزبان) است (Miransari, 2010).

وزن خشک اندام هوایی و ریشه: اثرات اصلی شوری، رقم و تیمار تلقیح بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه و تأثیر برهمکنش رقم و تیمار تلقیح بر وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد و تأثیر برهمکنش شوری و رقم بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش شوری موجب کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه در هر دو رقم مورد مطالعه شد (شکل 1A و 1B). در سطوح شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار میزان کاهش وزن خشک اندام هوایی، در رقم حساس بهار به‌ترتیب ١٦ و ٢٥ درصد و در رقم متحمل روشن ۷ و ١٤ درصد بود. این مقادیر کاهشی برای وزن خشک ریشه در رقم بهار ۱۲ و ٢٦ درصد و در رقم روشن ۷ و ۲۸ درصد بود. اصلی‌ترین دلیل کاهش سرعت رشد نسبی در شرایط تنش شوری، کاهش توسعه اندام‌های هوایی و تأخیر در ورود گیاه به مرحله ظهور سنبله است. گزارش شده که سمیت کادمیم با مهار فتوسنتز برگ، کاهش ویژگی‌های تبادلات گازی و تغییر جذب مواد معدنی، میزان رشد و ماده خشک گندم را کاهش می‌دهد. گرچه پاسخ گندم به سمیت کادمیم به نوع ژنوتیپ و سطح تنش کادمیم بستگی دارد (Rizwan *et al.*, 2016). یکی از دلایل کاهش وزن خشک ریشه در حضور فلزات سنگین و یون سدیم، به کاهش مقدار پتانسیل نسبی آب گیاه مربوط می‌شود. قرارگرفتن در معرض مقادیر زیاد یون سدیم و عناصر سنگین می‌تواند سبب اختلال در جریان آب در داخل گیاه و آسیب‌دیدن ریشه گیاه شود.

تلقیح گیاهان با قارچ میکوریزا موجب افزایش وزن خشک اندام هوایی در هر دو رقم مورد مطالعه گردید (شکل ۳A). در اثر تلقیح با گونه‌های قارچ *F. mosseae* و *Rh. intraradices*، میزان افزایش وزن خشک اندام هوایی در رقم روشن به‌ترتیب ۲۳ و ۱۹ درصد و در رقم بهار ۱۱ و ۱۲ درصد بود. در مطالعات متعددی اثر مثبت تلقیح با قارچ میکوریزا بر رشد گندم و دیگر گونه‌های گیاهی تحت شرایط آلودگی به کادمیم گزارش شده و این تأثیر مثبت به عواملی از قبیل بهبود تغذیه فسفر، افزایش جذب آب توسط هیف‌های قارچ و افزایش تراکم و طول ریشه نسبت داده شده است (Pawlowska and Charvat, 2004; Shahabivand *et al.*, 2012). به‌علاوه، مطالعات نشان داده است که قارچ‌های میکوریزا از طریق متابولیزه‌کردن پیش‌ساز اتیلن تنش‌زا، کربوکسیلیک اسید

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]



شکل ٤- مقایسه میانگین اثرات برهمکنش سه‌گانه شوری، رقم و تیمار تلقیح بر غلظت روی ریشه (A) و نسبت غلظت پتاسیم به سدیم اندام هوایی (B)

(ACC)، یا تولید مواد تنظیم‌کننده رشد گیاه مانند ایندول استیک اسید (IAA) و سیتوکنین‌ها باعث افزایش رشد گیاه می‌شوند (Deng and Cao, 2017).

غلظت فسفر اندام هوایی و ریشه: اثرات اصلی شوری، رقم و تیمار تلقیح و تأثیر برهمکنش شوری و رقم بر غلظت فسفر اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد و برهمکنش رقم و تیمار تلقیح بر غلظت فسفر اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد و برهمکنش شوری و تیمار تلقیح بر غلظت فسفر ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش شوری موجب کاهش غلظت فسفر اندام

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

هوایی و ریشه در هر دو رقم مورد مطالعه شد (شکل 1F و 1G). در سطوح شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار میزان کاهش غلظت فسفر اندام هوایی، در رقم حساس بهار به‌ترتیب ۹ و ۲۹ درصد و در رقم متحمل روشن ۳ و ۹ درصد بود. این مقادیر کاهشی برای غلظت فسفر ریشه در رقم بهار ۱۵ و ۳٤ درصد و در رقم روشن ۱۰ و ۲۳ درصد بود. مطالعات نشان داده که حتی در شرایط شوری زیاد غالباً تغذیه بهتر با فسفر به رشد بالاتر گیاه منجر می‌شود و علت آن است که یک زیست توده گیاهی بزرگ‌تر باعث رقیق‌شدن یون‌های سمی و تعدیل تنش شوری می‌گردد (Hammer *et al.*, 2011). بنابراین ارقام با توانایی جذب بیشتر فسفر در جهت حفظ و بقای خود در شرایط تنش شوری موفق‌تر عمل می‌کنند.

تلقیح گیاهان با قارچ میکوریزا موجب افزایش غلظت فسفر اندام هوایی در هر دو رقم مورد مطالعه گردید (شکل 3C). در اثر تلقیح با گونه‌های قارچ *F. mosseae* و *Rh. intraradices*، میزان افزایش غلظت فسفر اندام هوایی در رقم روشن به‌ترتیب ۲۵ و ۳۰ درصد و در رقم بهار ۱۹ و ۱۰ درصد بود. در مطالعه Sharma و همکاران (۲۰۱۱)، تلقیح ژنوتیپ گندم هندی با قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار در یک خاک لوم شنی با بهترین شرایط جذب فسفر، رشد و پیامدهای عملکرد را در گیاهان میکوریزایی به‌همراه داشت و باعث افزایش کارایی نهاده‌ها و صرفه‌جویی در مصرف کود فسفر شد. در کلیه تیمارها با افزایش سطح شوری، غلظت فسفر ریشه کاهش یافت. میزان این کاهش در تیمارهای بدون‌تلقیح و تلقیح با گونه‌های قارچ *F. mosseae* و *Rh. intraradices* در سطح شوری ۷۵ میلی‌مولار به‌ترتیب ۱۳، ۷ و ۱٦ درصد (بدون تفاوت معنی‌دار در تلقیح با قارچ *Rh. intraradices* و بدون تلقیح) و در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار ۳۲، ۲٦ و ۲۷ درصد بود (شکل 2B). تحقیقات نشان داده که قارچ‌های میکوریزا مواد مغذی غیرقابل جذب، به‌ویژه فسفر را جذب می‌کنند. بهبود وضعیت فسفر گیاه به‌عنوان مهم‌ترین استراتژی تحمل تنش شوری در گیاهان تلقیح شده است. با این حال، مطالعات دیگر نشان داده که تحمل به تنش شوری گیاهان میکوریزایی شده همواره با وضعیت بهبودیافته فسفر ارتباط ندارد، بلکه برخی از فرآیندهای فیزیولوژیکی دیگری نیز وجود دارند که در بهبود شرایط رشد این گیاهان در شرایط تنش کمک می‌کنند (Giri *et al.*, 2007).

نسبت غلظت پتاسیم به سدیم اندام هوایی و ریشه: اثرات اصلی شوری، رقم و تیمار تلقیح بر نسبت غلظت پتاسیم به سدیم اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد و برهمکنش سه گانه شوری، رقم و تیمار بر نسبت غلظت پتاسیم به سدیم اندام هوایی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). میزان کاهش نسبت غلظت پتاسیم به سدیم اندام هوایی در سطح شوری ۷۵ میلی‌مولار در ارقام روشن و بهار در تیمار بدون‌تلقیح به‌ترتیب ۱۳ و ۲۸ درصد، در تیمار تلقیح با قارچ *F. mosseae* به‌ترتیب ۱۷ و ۲۹ درصد و در تیمار تلقیح با قارچ *Rh. Intraradices*، به‌ترتیب ۳۰ و ٤ درصد و در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار در ارقام روشن و بهار در تیمار بدون‌تلقیح به‌ترتیب ٤۷ و ۷۵ درصد، در تیمار تلقیح با قارچ *F .mosseae* به‌ترتیب ۳۹ و ٦۲ درصد و قارچ *Rh. Intraradices*، به‌ترتیب ٤٤ و ٤۱ درصد بود (شکل 4B). افزایش نسبت غلظت پتاسیم به سدیم اندام هوایی در گیاهان تلقیح‌شده نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده نشان‌دهنده آن است که ارقام تلقیح‌شده توانایی افزایش جذب پتاسیم را بیشتر از سدیم تحت تنش شوری داشته که منجر به مقاومت به شوری آنها می‌شود. نتایج Rabie و Almadini (۲۰۰۵) نشان می‌دهد که در اثر همزیستی، پمپ‌های هیدروژن نیروی محرکه لازم برای افزایش نسبت غلظت پتاسیم به سدیم را فراهم می‌کنند تا مقاومت به شوری گیاهان افزایش یابد. Daei و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که نسبت پتاسیم به سدیم در رقم‌های مختلف گندم (کویر، روشن و طبسی) تلقیح‌شده با قارچ میکوریزا نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری بالاتر بود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی گندم می‌تواند عناصر سنگین را به‌خصوص در شرایط تنش شوری در اندام‌های خود تجمع دهد و آن را از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

طریق زنجیره غذایی به انسان منتقل کند، بر این اساس، کاهش جذب و انتقال آنها در این گیاه یکی از مسائل مهم برای کشاورزی پایدار و سلامت انسان است. این مطالعه نشان داد که قارچ‌های میکوریزا می‌توانند تجمع و اثرات نامطلوب عناصر سنگین در گیاهان گندم را تحت تنش شوری کاهش دهند. از طرفی تلقیح گیاه با این میکروارگانیزم‌های سودمند موجب افزایش رشد اندام هوایی و ریشه گندم و نیز افزایش جذب فسفر و پتاسیم به‌خصوص در رقم متحمل به شوری روشن گردید.

منابع

Adeniji, B. A., Budimir-Hussey, M. T. and Macfie, S. M. (2010) Production of organic acids and adsorption of Cd on roots of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). Acta Physiologiae Plantarum 32: 1063-1072.

Audet, P. and Charest, C. (2006) Effects of AM colonization on "wild tobacco" plants grown in zinc-contaminated soil. Mycorrhiza 16: 277-283.

Ayers, R. S. and Westcot, D. W. (1985) Water quality for irrigation. FAO irrigation and drainage 20.

Daei, G., Ardekani, M., Rejali, F., Teimuri, S. and Miransari, M. (2009) Alleviation of salinity stress on wheat yield, yield components, and nutrient uptake using arbuscular mycorrhizal fungi under field conditions. Journal of Plant Physiology 166: 617-625.

Dahlin, A. S., Eriksson, J., Campbell, C. D. and Oborn, I. (2016) Soil amendment affects Cd uptake by wheat—are we underestimating the risks from chloride inputs? Science of the Total Environment 554: 349-357.

Dalpe, Y. (2003) Mycorrhizal fungi biodiversity in Canadian soils. Canadian Journal of Soil Science 83: 321-330.

Deng, Z. and Cao, L. (2017) Fungal endophytes and their interactions with plants in phytoremediation: A review. Chemosphere 168: 1100-1106.

Farid, M., Shakoor, M. B., Ehsan, S., Ali, S., Zubair, M. and Hanif, M. (2013) Morphological, physiological and biochemical responses of different plant species to Cd stress. International Journal Chemical Biochemical Sciences 3: 53-60.

Fu, X., Dou, C., Chen, Y., Chen, X., Shi, J., Yu, M. and Xu, J. (2011) Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L. Journal of Hazardous Materials 186: 103-107.

Gao, Y. Z. and Zhu, L. Z. (2005) Phytoremediation for phenanthrene and pyrene contaminated soils. Journal of Environmental Sciences-Amsterdam 17: 14-18.

Garrity, G. M., Bell, J. A. and Lilburn, T. (2005) Class I. Alphaproteobacteria class. nov. Bergey's Manual® of Systematic Bacteriology 2: 1-574.

Giri, B., Kapoor, R. and Mukerji, K. (2007) Improved tolerance of *Acacia nilotica* to salt stress by arbuscular mycorrhiza, *Glomus fasciculatum* may be partly related to elevated K/Na ratios in root and shoot tissues. Microbial Ecology 54: 753-760.

Hammer, E. C., Nasr, H., Pallon, J., Olsson, P. A. and Wallander, H. (2011) Elemental composition of arbuscular mycorrhizal fungi at high salinity. Mycorrhiza 21: 117-129.

Hart, J. J., Welch, R. M., Norvell, W. A. and Kochian, L. V. (2006) Characterization of cadmium uptake, translocation and storage in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration. New Phytologist 172: 261-271.

Li, H., Luo, N., Zhang, L. J., Zhao, H. M., Li, Y. W., Cai, Q. Y., Wong, M. H. and Mo, C. H. (2016) Do arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice?. Science of the Total Environment 571: 1183-1190.

Liu, J., Li, K., Xu, J., Liang, J., Lu, X., Yang, J. and Zhu, Q. (2003a) Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes. Field Crops Research 83: 271-281.

Liu, K., Lv, J., He, W., Zhang, H., Cao, Y. and Dai, Y. (2015) Major factors influencing cadmium uptake from the soil into wheat plants. Ecotoxicology and Environmental Safety 113: 207-213.

Mahajan, S. and Tuteja, N. (2005) Cold, salinity and drought stresses: An overview. Archives of Biochemistry and Biophysics 444: 139-158.

Miransari, M. (2010) Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress. Plant Biology 12: 563-569.

Muhling, K. H. and Lauchli, A. (2003) Interaction of NaCl and Cd stress on compartmentation pattern of cations, antioxidant enzymes and proteins in leaves of two wheat genotypes differing in salt tolerance. Plant and Soil 253: 219-231.

Olsen, S. R. (1954) Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. United States Department Of Agriculture, Washington.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

Pawlowska, T. E. and Charvat, I. (2004) Heavy-metal stress and developmental patterns of arbuscular mycorrhizal fungi. Applied and Environmental Microbiology 70: 6643-6649.

Porcel, R., Aroca, R. and Ruiz-Lozano, J. M. (2012) Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review. Agronomy for Sustainable Development 32: 181-200.

Rabie, G. and Almadini, A. (2005) Role of bioinoculants in development of salt-tolerance of *Vicia faba* plants under salinity stress. African Journal of Biotechnology 4: 210-222.

Rivelli, A. R., De Maria, S., Puschenreiter, M. and Gherbin, P. (2012) Accumulation of cadmium, zinc, and copper by *Helianthus annuus* L.: Impact on plant growth and uptake of nutritional elements. International Journal of Phytoremediation 14: 320-334.

Rizwan, M., Ali, S., Abbas, T., Zia-ur-Rehman, M., Hannan, F., Keller, C., Al-Wabel, M. I. and Ok, Y. S. (2016) Cadmium minimization in wheat: A critical review. Ecotoxicology and Environmental Safety 130: 43-53.

Safari Sinegani, A. A. and Shanbeh Dastjerdi, F. (2009) The accumulation of zinc and nickel in Irankoh indigenous plant species on a contaminated land. Soil and Sediment Contamination 18: 525-534.

Salah, S. A. and Barrington, S. F. (2006) Effect of soil fertility and transpiration rate on young wheat plants (*Triticum aestivum*) Cd/Zn uptake and yield. Agricultural Water Management 82: 177-192.

Shafi, M., Bakht, J., Hassan, M. J., Raziuddin, M. and Zhang, G. (2009) Effect of cadmium and salinity stresses on growth and antioxidant enzyme activities of wheat (*Triticum aestivum* L.). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 82: 772-776.

Shahabivand, S., Maivan, H. Z., Goltapeh, E. M., Sharifi, M. and Aliloo, A. A. (2012) The effects of root endophyte and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and cadmium accumulation in wheat under cadmium toxicity. Plant Physiology and Biochemistry 60: 53-58.

Shahabivand, S., Parvaneh, A. and Aliloo, A. A. (2017) Root endophytic fungus *Piriformospora indica* affected growth, cadmium partitioning and chlorophyll fluorescence of sunflower under cadmium toxicity. Ecotoxicology and Environmental Safety 145: 496-502.

Sharma, M. P., Reddy, U. G. and Adholeya, A. (2011) Response of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat (*Triticum aestivum* L.) grown conventionally and on beds in a sandy loam soil. Indian Journal of Microbiology 51: 384-389.

Upadhyay, S. K., Singh, J. S., Saxena, A. K. and Singh, D. P. (2012) Impact of PGPR inoculation on growth and antioxidant status of wheat under saline conditions. Plant Biology 14: 605-611.

Zhang, C., Sale, P. W. and Tang, C. (2016) Cadmium uptake by *Carpobrotus rossii* (Haw.) Schwantes under different saline conditions. Environmental Science and Pollution Research 23: 13480-13488.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]

Effect of inoculation with mycorrhizal fungi on the plant growth and the elements uptake in two wheat cultivars (*Tirticum aestivum* L.) under concurrent salinity and heavy metals stress condition

Firoozeh Fayaz[1], Morteza Zahedi[1*], Saeed Tarkesh Esfahani[2]
[1]Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
[2] Department of Arid Land and Desert Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran
(Received: 16/09/2019, Accepted: 15/01/2020)

Abstract

The soil salinity and the diffusion of potentially toxic chemicals into the soil environment through industrial and agricultural activities are known as important factors affecting the productivity of crop plants. Thus, an efficient strategy to increase crop yield, and to improve human and environmental health, is necessary to mitigate the impacts of these detrimental factors. Accordingly, a factorial pot experiment using a randomized complete block design was conducted to investigate the effects of symbiosis with mycorrhizal fungi on the growth and heavy element absorption rate in two bread wheat cultivars (Roshan and Bahar) grown under salinity stress within a soil contaminated with heavy metals. The treatments consisted of irrigation water salinity at three levels (0, 75 and 150 mM NaCl) and plant inoculation at three levels (no-inoculation, inoculation with *Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices* mycorrhizal fungi). Salinity stress reduced shoot and root dry weights but increased the concentration of cadmium, lead and zinc in the shoot and root tissues of both treated cultivars. The increase in Cd concentration and the decrease in shoot dry weight were significantly lower in Roshan (salt tolerant) than in Bahar (salt sensitive) cultivar. Under both none-saline and saline conditions, the shoot and root weights of the two studied cultivars were increased in the plants inoculated with *F. mosseae* and *Rh. intraradices* compared to the none-inoculated plants but the increases were greater in Roshan than in Bahar. Moreover, mycorrhizal inoculation decreased the concentration of cadmium and lead in shoots. However, the extent of these decreases was dependent on fungal species, salinity level and the used cultivar. The results of this experiment showed that while salinity decreased plant growth and increased heavy metal accumulation, mycorrhizal inoculation improved plant growth and decreased the concentration of these elements in wheat plants.

Keywords: Heavy metals, wheat cultivars, *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus intraradices*

Corresponding author, Email: mzahedi@cc.iut.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.17.4]