فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۳، شماره ۶۲، مهر و آبان‌ماه ۱۴۰۳ صفحه: ۱۶۱-۱۷۶
https://doi.org/10.22034/13.62.161

مقاله پژوهشی

اثر قارچ آربوسکولارمیکوریز و ورمی‌کمپوست بر صفات مورفوفیزیولوژیکی عملکرد دانه و توان گیاه‌پالایی آرسنیک در گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.)

حسن سالاری [۱ و ۲]، ریحانه عموآقایی*[۱]، حسین مظفری[۲]
[۱] گروه زیست‌شناسی گیاهی، دانشکده علوم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
[۲] گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷)

چکیده
تأثیر تلقیح میکوریزی و ورمی‌کمپوست بر تحمل و توان گیاه‌پالایی فلزات سنگین در گیاهان ثابت شده است، اما مطالعات مربوط به اثر ترکیبی تلقیح میکوریزی و ورمی‌کمپوست در این زمینه محدود است. در همین راستا، یک آزمایش گلخانه‌ای به منظور بررسی اثر تیمار منفرد یا ترکیبی با ورمی‌کمپوست (۸ درصد وزنی) و تلقیح با ***Rhizophagus intraradices*** بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه و تجمع آرسنیک در گیاه گلرنگ در شرایط بدون تنش و در حضور ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک در کیلوگرم در خاک، انجام شد. بر طبق تجزیه واریانس، اثر متقابل آرسنیک و کودهای زیستی بر بیشتر صفات معنی‌دار بود. مقایسه میانگین داده‌ها هم نشان داد که تیمار ترکیبی به طور مؤثرتری نسبت به کاربرد منفرد تلقیح میکوریزی و ورمی‌کمپوست باعث بهبود وزن خشک ریشه و بخش هوایی، عملکرد دانه، محتوای کلروفیل، غلظت فسفر و نسبت فسفر به آرسنیک در برگ‌ها در هر دو شرایط بدون تنش و تحت تنش آرسنیک شد. علاوه‌براین، تیمار توأم بیشتر از اعمال منفرد تلقیح میکوریزی و ورمی‌کمپوست، میزان نشت الکترولیتی، غلظت آرسنیک برگ و فاکتور انتقال آرسنیک به بخش هوایی را کاهش، اما تجمع کل آرسنیک در گیاه و فعالیت آنزیم پراکسیداز در برگ‌های گیاهان تحت تنش آرسنیک را افزایش داد. نتایج این تحقیق نشان داد که اگر چه کاربرد توأم تلقیح میکوریزی و ورمی‌کمپوست به دلیل افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه توان گیاه‌پالایی گلرنگ را تقویت می‌کند اما در رابطه با اثر رقت رشد، سمیت آرسنیک را هم تعدیل می‌کند و رشد و عملکرد دانه را بهبود می‌دهد.

کلمات کلیدی: اثر رقت رشد، تجمع کل آرسنیک، غلظت فسفر، فاکتور انتقال آرسنیک، کلروفیل

مقدمه
اثر آلاینده‌های محیط زیست بر کیفیت گیاهان زراعی یکی از مسائل مهم برای مناطق شهری و حومه شهرها است که در سال‌های اخیر توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. بسیاری از خاک‌های کشاورزی در اثر فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از مواد نگهدارنده چوب حاوی آرسنیک، آفت‌کش‌ها، رنگدانه‌ها، علف‌کش‌ها، افزودنی‌های خوراک، ذوب و استخراج معدن در معرض آلودگی آرسنیک قرار گرفته‌اند (Nabi *et al.*, 2021). افزایش آرسنیک در خاک موجب کاهش رشد و عملکرد گیاهان می‌شود. دلیل اصلی سمی بودن زیاد آرسنیک شباهت شیمیایی آن به فسفر است که موجب می‌شود این عنصر در ملکول‌های زیستی نظیر آدنوزین

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: rayhanehamooaghaie@yahoo.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]
[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

تری‌فسفات (ATP) یا در ساختار غشای فسفولیپیدی سلول‌ها و اجزای داخلی سلول و همچنین بیشتر آنزیم‌های حیاتی جانشین فسفر شود و پیوندهای کوالانس قوی‌تر از فسفر برقرار کند. علاوه‌براین آرسنیک با گروه‌های سولفیدریل (SH–) آنزیم‌ها و پروتئین‌ها واکنش داده و مانع عملکرد سلولی و باعث مرگ می‌شود. احیای آرسنیک به‌طور مستقیم یا بر هم خوردن فرآیندهای تنفسی و فتوسنتری به‌طور غیرمستقیم، تولید گونه‌های فعال اکسیژن در گیاهان را القا می‌کند که می‌تواند باعث آسیب اکسیداتیو به پروتئین‌ها، لیپیدها و اسیدهای نوکلئیک شود (Chandrakar *et al*., 2016). با توجه به اثرات مضر آرسنیک، تحقیقات مختلفی برای کمتر کردن ورود این عنصر خطرناک به زنجیره‌های غذایی در حال انجام است که از جمله می‌توان به استفاده کمتر از کودهای شیمیایی و حرکت به سمت استفاده از کودهای زیستی به ویژه کودهای میکوریزی و ورمی‌کمپوست‌ها اشاره کرد.

همزیستی میکوریزی باعث بهبود جذب آب و افزایش جذب عناصر ضروری و مخصوصاً فسفات در گیاهان می‌شود و در نتیجه رشد و عملگرد گیاهان در شرایط تنش و غیرتنش را بهبود می‌دهد (اطرشی و همکاران۱۳۹۴؛ Begum *et al*., 2019). برای مثال تلقیح با قارچ میکوریز عملکرد دانه، شاخص کلروفیل، عملکرد پروتئین، وزن هزار دانه و عملکرد بیولوژیک را در گلرنگ در شرایط بدون تنش و تحت تنش خشکی افزایش داد (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۹). فرج‌زاده و اسدی (۱۳۹۸) هم گزارش کردند دو تیمار همزیستی با قارچ‌های میکوریزی *Glomus intraradise* و *Glomus hoei* باعث بهبود محتوای فسفر و افزایش عملکرد دانه و روغن گلرنگ شد. یک مطالعه نشان داد همزیستی میکوریزی باعث کاهش جذب آرسنیک و افزایش جذب فسفات در مقایسه با گیاهان غیرمیکوریزی می‌شود (Alam *et al*., 2020). اثرات محافظتی تلقیح توسط قارچ‌های آربوسکولار میکوریز روی گیاهان تحت تنش آرسنیک ممکن است با تبدیل آرسنیک معدنی به فرم آلی کمتر سمی، با رقیق نمودن غلظت آرسنیک با افزایش زیست‌توده گیاهی و تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی مرتبط باشد (Li *et al*., 2016). از سوی دیگر در برخی منابع تلقیح با وزیکولار آربوسکولار میکوریز به‌عنوان یک شیوه بیولوژیکی برای بهبود گیاه‌پالایی معرفی شده است. امانی‌فر و همکاران (۱۳۹۱) دریافتند فاکتور انتقال سرب از ریشه به بخش هوایی در گیاهان ذرت میکوریزی کمتر از گیاهان غیرمیکوریزی بود اما چون تیمار میکوریز بیوماس گیاه را افزایش داد میزان کل برداشت سرب از خاک توسط گیاهان میکوریزی بیشتر بود. در گیاهان میکوریزی، میسلیوم خارجی قارچ به دلیل سطح وسیع‌تر، کارایی بیشتری نسبت به ریشه گیاه برای جذب فلزات سنگین دارد. اما فلزات سنگین در دیواره سلولی قارچ و واکوئل سلول گیاهی، غیرمتحرک می‌شوند و انتقال آنها به بخش هوایی کاهش می‌یابد. بنابراین همزیستی میکوریزی ممکن است به تثبیت گیاهی (Phytostablization) فلزات سنگین کمک کند. به‌نظر می‌رسد تأثیر قارچ‌های آربوسکولار میکوریز بر کاهش یا افزایش جذب فلزات سنگین یا شبه فلزاتی مثل آرسنیک تا حد زیادی به گونه‌های گیاهی، رقم، نوع و غلظت فلزات در خاک و همچنین گونه‌های آربوسکولار میکوریز قارچی وابسته است (Dhalaria *et al*., 2020).

ورمی‌کمپوست‌ها یکی دیگر از کودهای مفید هستند که از طریق فرآوری ضایعات آلی نظیر کود دامی، بقایای گیاهی و غیره طی یک فرایند غیرگرمادوست توسط کرم‌های خاکی تولید می‌شوند. این مواد هنگام عبور از بدن کرم آغشته به مخاط دستگاه گوارش، ویتامین‌ها و آنزیم‌ها شده و در نهایت به صورت یک کود آلی غنی‌شده درمی‌آیند. ورمی‌کمپوست با داشتن مقادیر زیادی مواد هیومیکی یک کود زیستی محرک رشد گیاه است و در رابطه با تخلخل زیاد و قدرت جذب و نگهداری بالای آب و محتوای بالای عناصر معدنی یک کود بسیار مفید برای بهبود ساختمان، تهویه و زهکشی و عناصر غذایی خاک و رشد گیاه است (Joshi *et al*., 2015: Makkar *et al*., 2022). علاوه‌براین، مطالعات متعدد نشان داده که کاربرد ورمی‌کمپوست باعث افزایش رشد و تحمل گیاهان در برابر تنش‌های مختلف از جمله تنش فلزات سنگین می‌شود

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

(عموآقایی و بقایی ۱۳۹۳؛ Amooaghaie and Golmohammadi, 2017; Al Mamun *et al.*, 2021; Makkar *et al.*, 2022). خواص شیمیایی فلزات سنگین منجر به تمایل بسیار قوی برای اتصال به مواد آلی خاک می‌شود و تشکیل کمپلکس‌های فلزی قوی با کاهش دسترسی فلزات سنگین، می‌تواند به بهبود رشد گیاه در خاک‌های آلوده کمک کند (Gul *et al.*, 2015). Solmaz و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که با افزایش دوز ورمی‌کمپوست، محتوای کادمیوم، کروم، نیکل، سرب و کبالت در خیار کاهش یافت. در مقابل یک مطالعه نشان داد که افزودن ورمی‌کمپوست به خاک، میزان برداشت کادمیوم، کروم و سرب از خاک‌های آلوده توسط گیاه جو دوسر را افزایش می‌دهد (Hoehne *et al.*, 2016).

گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) یک محصول دانه روغنی بومی ایران و از خانواده کاسنیان است که اثر مثبت کاربرد منفرد ورمی‌کمپوست و آربوسکولار میکوریز بر رشد و عملکرد دانه آن در شرایط بدون تنش یا تحت تنش‌های دیگر در چند تحقیق گزارش شده است (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۹، صالحی و همکاران، ۱۴۰۱). اما تأثیر این تیمارها در تحمل تنش فلزات سنگین و خصوصاً اثر ترکیبی آنها در تحمل و تجمع آرسنیک در این گیاه بررسی نشده است. بنابراین پژوهش حاضر برای بررسی اثر کاربرد جداگانه یا توأم ورمی‌کمپوست و آربوسکولار میکوریز بر صفات زراعی و فیزیولوژیکی و تجمع آرسنیک در گیاه گلرنگ طراحی شده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، اثر غلظت‌های آرسنیک در دو سطح (صفر و ۸۰ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک) و کودهای زیستی در چهار سطح (شاهد، میکوریز، ورمی‌کمپوست و ترکیب آنها) بر روی گلرنگ در قالب آزمایشی به صورت فاکتوریل با طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. برای این منظور از خاک یک منطقه به دور از آلایندگی فلزات سنگین از استان کرمان با مختصات جغرافیایی ۲۹/۵۲۱۷ درجه شمالی و ۵۶/۸۱۸۳ درجه شرقی استفاده شد.

لازم به ذکر است که با توجه به نتایج آزمایش قبلی ما (سالاری و همکاران، ۱۴۰۳) تیمار ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک در هر کیلوگرم خاک یک سطح تنش آرسنیک بود که بیش از ۵۰ درصد کاهش رشد ایجاد کرد و ورمی‌کمپوست با نسبت ۸ درصد وزنی بیشترین اثر را بر بهبود آثار منفی تنش آرسنیک داشت و لذا در این آزمایش از این سطوح تیمارها استفاده شد.

خاک با اتوکلاو به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد استریل شد. برای تیمار ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک در هر کیلوگرم خاک، مقدار مورد نیاز آرسنات سدیم ($Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$) در ۵۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر حل شد و با خاک هر گلدان کاملاً مخلوط شد. برای تثبیت آرسنیک در خاک، سیکل‌های اشباع مکرر با آب‌مقطر به مدت یک ماه قبل از کشت انجام شد.

مایه تلقیح میکوریزی مورد استفاده (۵۰ گرم) شامل خاک شنی، بخش‌های ریشه ذرت کلونیزه شده با قارچ‌های میکوریزی *Rhizophagus intraradices* و هاگ و هیف‌های میکوریزی بود که از شرکت ارگانیک در همدان تکثیر شده بود. مشخصات فیزیکوشیمیایی ورمی‌کمپوست مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ذکر شده است.

پس از تثبیت آرسنیک در خاک، ورمی‌کمپوست با نسبت ۸ درصد وزنی مطابق طرح آماری به برخی گلدان‌ها اضافه شد. سپس برای تلقیح با *R. intraradices*، به ازای هر کیلوگرم خاک از هر گلدان ۵۰ گرم مایه تلقیح در زمان کاشت در حدود ۳ سانتی‌متر زیر بذر مخلوط شد و ۵۰ گرم مایه تلقیح اتوکلاو شده نیز به گلدان‌های تلقیح‌نشده اضافه شد. همه گلدان‌ها بسته به نیاز گیاهان و شرایط محیطی به خوبی آبیاری شدند. بذرهای *Carthamus tinctorius* L. (رقم گلدشت) از مؤسسه اصلاح و بهبود نهال و بذر (کرج، ایران) تهیه شدند و بذرهای استریل‌شده در گلدان کشت شدند. پس از طی فرایند طبیعی رشد و اتمام گلدهی، ارتفاع گیاه اندازه‌گیری شد و از برگ‌های تازه هر گلدان برای اندازه‌گیری کلروفیل و نشت الکترولیت‌ها نمونه‌برداری شد و همچنین تعدادی از نمونه‌ها پس از انجماد با استفاده از نیتروژن مایع، برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]
[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و ورمی‌کمپوست مورد استفاده در این تحقیق

	Cu	Zn	Mn	Fe	As	K	P	N	O.C	pH (1:5)	EC (1:5) (ms/cm)	CEC (meq/100g)
	mg/kg				µg/kg	(%)						
خاک	۲۱	۱۲	۴۵۰	۲۲/۷۶	۰/۵	۲۴/۷	۰/۵	۰/۰۰۳	۰/۲۷	۶/۴	۱/۷۸	۱۵/۱۱
ورمی‌کمپوست	۱۰	۴۶	۱۰۵	۱۵	۰/۰۰۵	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۹۸	۱۲/۰۶	۷/۴	۱/۲۲	۱۶/۴۷

آنتی‌اکسیدانی گایاکول پراکسیداز در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پس از اتمام دوره رشد و رسیدن بذرها و زرد و خشک‌شدن کامل گیاه، وزن کل بذرها به عنوان عملکرد دانه و وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاهان برداشت‌شده اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی، اندازه‌گیری کلروفیل: در نمونه‌های برگ تازه، کلروفیل به کمک استون ۸۰٪ استخراج و جذب عصاره حاصل در طول‌موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر خوانش شد. میزان کلروفیل *a* و *b* برگ با استفاده از فرمول‌های پیشنهادی Lichtenthaler و Wellburn (۱۹۸۳) اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری نشت الکترولیت و فعالیت آنزیم پراکسیداز: نشت الکترولیتی (EL) بر اساس روشی که توسط Dionisio-Sese و Tobita (۱۹۹۸) توصیف شده بود با فرمول زیر اندازه‌گیری شد.:

$$EL (\%) = EC1 / EC2 \times 100$$

که در آن EC1 و EC2 هدایت الکتریکی محلولی که برگ در آن غوطه‌ور شده قبل و بعد از جوشاندن است.

برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز از روش Doerge و همکاران (۱۹۹۷) استفاده شد. یک واحد فعالیت آنزیم پراکسیداز بر اساس تغییر در جذب نوری در دقیقه و با استفاده از ضریب خاموشی $mM^{-1}Cm^{-1}$ ۲۶/۶۱ محاسبه شد.

سنجش آرسنیک و فسفر گیاه و شاخص‌های گیاه‌پالایی: جهت سنجش میزان آرسنیک در نمونه گیاهی ۰/۲ گرم از نمونه ریشه و بخش هوایی گیاه خشک شده با ۹ میلی‌لیتر اسید نیتریک و ۰/۵ میلی‌لیتر پراکسیدهیدروژن هضم و اندازه‌گیری آرسنیک و فسفر گیاه با استفاده از دستگاه ICP (Varian ساخت کشور استرالیا) انجام شد. محتوای آرسنیک بخش هوایی و ریشه، فاکتور انتقال (TF) و میزان برداشت کل آرسنیک طبق رابطه‌های زیر محاسبه شد (Heidari *et al.*, 2020).

رابطه ۱:

محتوای آرسنیک بخش‌هوایی و ریشه = غلظت آرسنیک در اندام × زیست‌توده هر اندام

رابطه ۲:

فاکتور انتقال = غلظت آرسنیک در ریشه / غلظت آرسنیک در شاخساره

رابطه ۳:

میزان کل جذب در هر گیاه = محتوای کل آرسنیک بخش‌هوایی + محتوای کل آرسنیک ریشه

لازم به ذکر است که چون غلظت آرسنیک در ریشه و بخش هوایی متفاوت بوده است، رابطه ۱ برای این دو بخش جداگانه محاسبه و بعد نتایج برای برآورد میزان کل برداشت با هم جمع شده است.

داده‌های بدست آمده در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار SPSS 24.0 مورد تجزیه و تحلیل واریانس قرار گرفت و مقایسه میانگین با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ٪۹۵ انجام شد. همچنین نمودارها با نرم‌افزار Excel 2016 رسم شد.

نتایج

اثر آرسنیک و کودهای زیستی بر رشد و عملکرد دانه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده آرسنیک و کودهای زیستی بر صفات مورفوفیزیولوژیکی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. همچنین اثر متقابل این فاکتورها بر اکثر صفات (بجز کلروفیل *a*) معنی‌دار است (جدول ۲).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف آرسنیک و کودهای زیستی بر پارامترهای رشد، عملکرد دانه، محتوای فسفر و کلروفیل برگ گلرنگ تحت تنش آرسنیک

متغیرها	درجه آزادی	وزن خشک بخش هوایی	وزن خشک ریشه	ارتفاع	عملکرد دانه	فسفر	نسبت فسفر به آرسنیک	کلروفیل *a*	کلروفیل *b*
آرسنیک	۱	۷۳/۸۴۳**	۱/۸۸۷**	۱۱۷۸/۶۶۲**	۱۶/۸۰۷**	۲۵/۹۷۹**	۲/۶۷۵**	۱۳/۴۷۰**	۶/۲۳۲**
انواع کود زیستی	۳	۸/۰۱۹**	۲/۱۳۸**	۲۴۲/۸۴۹**	۳/۸۱۳**	۵/۸۲۲**	۰/۰۹۸**	۱/۳۶۴**	۰/۴۳۸**
آرسنیک×کود زیستی	۳	۶/۱۶۳**	۰/۱۰۶**	۱۰/۹۳۲**	۰/۰۴۲ *	۰/۸۵۸**	۰/۰۹۸**	۰/۰۲۸ns	۰/۰۹۸**
خطا	۱۶	۱/۱۶	۰/۰۱۸	۱/۵۷۳	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۱	۰/۰۲۱	۰/۰۰۹

**** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ns عدم معنی‌داری**

مقایسه میانگین نشان داد که وزن خشک ریشه و بخش هوایی، ارتفاع و عملکرد دانه گیاه تحت تیمار ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک، کاهش یافت و تیمار خاک با ورمی‌کمپوست و میکوریز و به ویژه تیمار ترکیبی (ورمی‌کمپوست + میکوریز) به‌طور معنی‌داری این صفات را در هر دو حالت بدون تنش و تنش آرسنیک بهبود بخشید. تیمار ترکیبی (ورمی‌کمپوست + میکوریز) مؤثرتر بود و وزن خشک ریشه و بخش هوایی را به ترتیب به ۱۰۰ و ۳۵ درصد در شرایط بدون تنش و ۱۰۰ و ۹۲ درصد تحت تنش آرسنیک افزایش داد. همچنین تیمار ترکیبی (ورمی‌کمپوست + میکوریز) عملکرد دانه را به ترتیب به میزان ۷۹/۶ درصد در شرایط بدون تنش و ۱/۹۵ برابر در گیاهان تحت تنش آرسنیک افزایش داد (شکل ۱).

اثر آرسنیک و کودهای زیستی بر محتوای کلروفیل *a*، *b*: تنش آرسنیک به‌طور معنی‌داری محتوای کلروفیل *a* و *b* را در برگ‌ها کاهش داد (شکل ۲). تیمار خاک با ورمی‌کمپوست و تلقیح با میکوریز و همچنین تیمار ترکیبی (ورمی‌کمپوست + میکوریز)، به‌طور معنی‌داری باعث افزایش محتوای کلروفیل *a* و *b* تحت شرایط بدون تنش و تحت تنش آرسنیک شد (شکل ۲). به هر حال، تیمار ترکیبی (ورمی‌کمپوست + میکوریز) مؤثرتر بود و به ترتیب باعث افزایش محتوای کلروفیل *a* و *b* به میزان ۲۷/۴ و ۳۲/۰۸ درصد در شرایط بدون تنش و ۳۶/۳۶ و ۳۸/۱۵ درصد در برگ گیاهان تحت تنش در مقایسه با تیمار آرسنیک به تنهایی شد (شکل ۲).

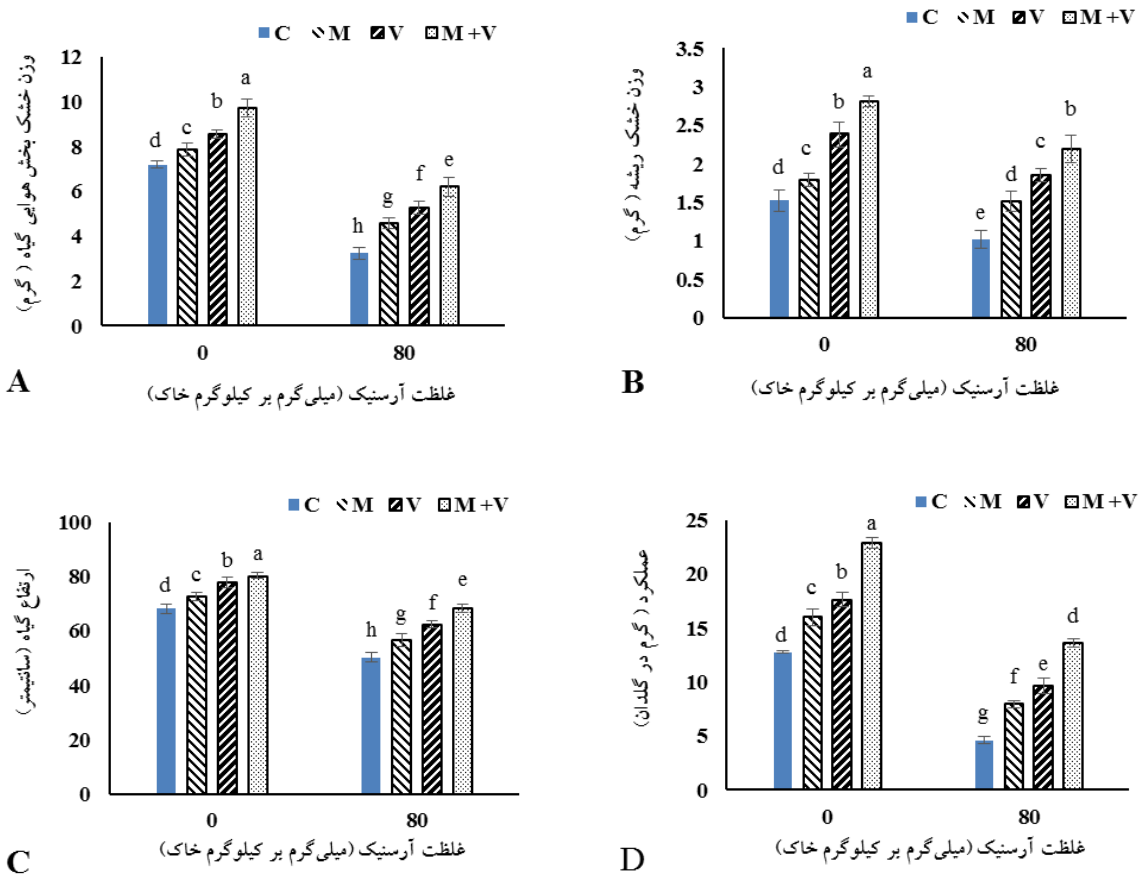
اثر آرسنیک و کودهای زیستی بر غلظت فسفر و نسبت فسفر به آرسنیک در برگ: با توجه به نتایج آنالیز واریانس (جدول ۲) اثر مستقل و متقابل آرسنیک و کودهای زیستی بر غلظت فسفر و نسبت فسفر به آرسنیک در برگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بوده است.

با قرار گرفتن در معرض ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک، غلظت فسفر در برگ تقریباً ۵۰ درصد کاهش یافت (شکل ۳). تیمار با میکوریز، ورمی‌کمپوست و تیمار ترکیبی (ورمی‌کمپوست + میکوریز) میزان فسفر را در برگ به ترتیب به میزان ۲۵، ۲۰ و ۳۰ ٪ در شرایط بدون تنش و ۹۰، ۳۰ و ۱۰۰ درصد تحت تنش آرسنیک افزایش داد (شکل ۳-A). تیمار با میکوریز و ورمی‌کمپوست و تیمار ترکیبی (ورمی‌کمپوست + میکوریز) نسبت فسفر به آرسنیک را در برگ به میزان ۹۲، ۶۹ و ۱/۷ برابر نسبت به تیمار آرسنیک تنها افزایش داد (شکل ۳-B).

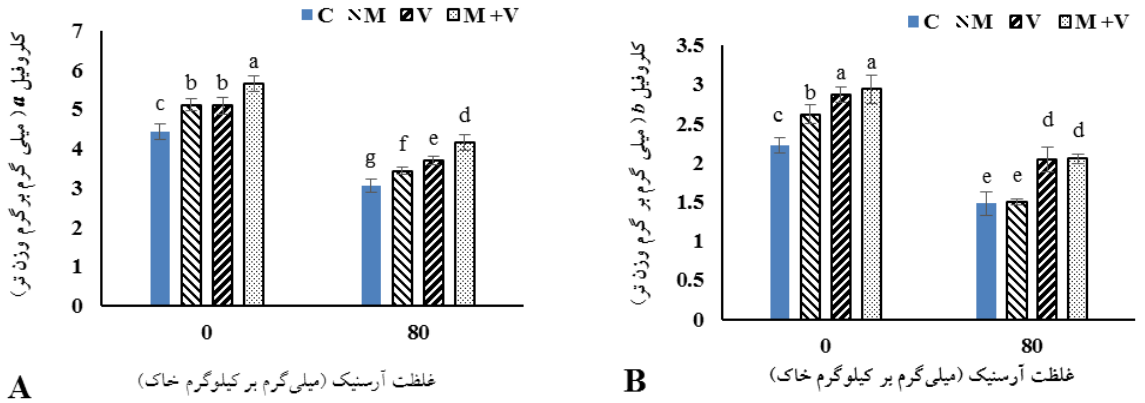
اثر آرسنیک و کودهای زیستی بر غلظت و محتوای آرسنیک در ریشه، برگ و فاکتور انتقال آرسنیک: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده آرسنیک و کودهای زیستی بر غلظت و محتوای آرسنیک در ریشه، برگ و فاکتور انتقال آرسنیک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بوده است. همچنین اثر متقابل این فاکتورها بر همه صفات فوق در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۲).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]



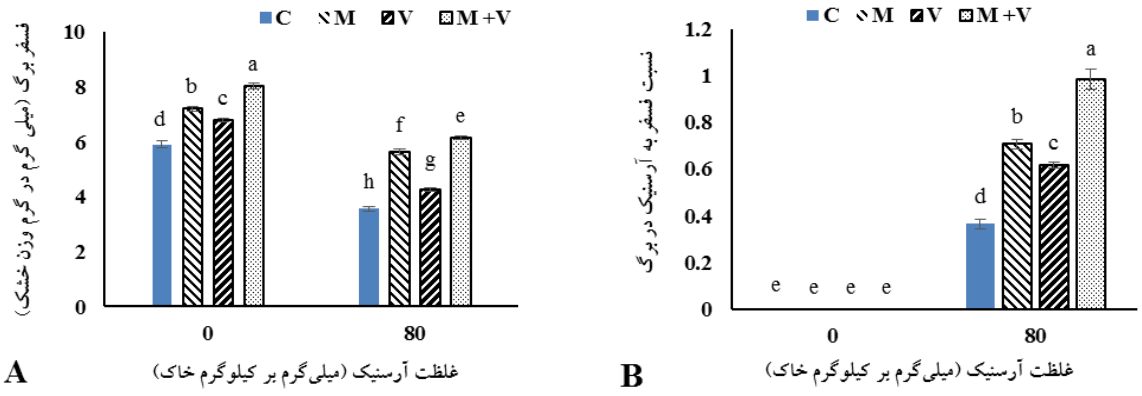
شکل ۱- اثرات متقابل ورمی‌کمپوست (۸٪) و تلقیح با *R. intraradices* بر وزن خشک بخش هوایی (A) و ریشه (B)، ارتفاع (C) و عملکرد دانه (D). تیمارهای دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد اختلاف معنی‌دار هستند. در روی نمودارها حروف C کنترل، M میکوریز،V ورمی‌کمپوست، و M+V تیمار ترکیبی میکوریز و ورمی‌کمپوست را معرفی می‌کند.



شکل ۲- اثرات متقابل ورمی‌کمپوست (۸٪) و تلقیح با *R. intraradices* بر کلروفیل *a* (A)، کلروفیل *b* (B)، درگلرنگ تحت تنش ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک. تیمارهای دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد اختلاف معنی‌دار هستند. در روی نمودارها حروف C کنترل، M میکوریز،V ورمی‌کمپوست، و M+V تیمار ترکیبی میکوریز و ورمی‌کمپوست را معرفی می‌کند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]



شکل ۳- اثرمتقابل ورمی‌کمپوست (۸٪) و تلقیح با *R. intraradices* بر میزان فسفر برگ (A) و نسبت فسفر به آرسنیک در برگ (B) گلرنگ تحت تنش ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک. تیمارهای دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد اختلاف معنی‌دار هستند. در روی نمودارها حروف C کنترل، M میکوریز،V ورمی‌کمپوست، و M+V تیمار ترکیبی میکوریز و ورمی‌کمپوست را معرفی می‌کند.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف آرسنیک و کودهای زیستی بر غلظت و تجمع کل آرسنیک در ریشه و برگ، نشت الکترولیتی و پراکسیداز در برگ گلرنگ تحت تنش آرسنیک

متغیرها	درجه آزادی	آرسنیک ریشه	آرسنیک برگ	تجمع کل در ریشه	تجمع کل در برگ
آرسنیک	۱	۹۰۸۸/۹۸۸**	۳۵۸/۴۹۴**	۲۳۶۶۲/۰۳۵**	۷۷۱۹/۸۵۳**
انواع کود زیستی	۳	۳۹/۱۰۴**	۳/۴۹**	۴۱۷/۹۸۴**	۱۴/۰۹۸**
آرسنیک×کود زیستی	۳	۳۹/۱۰۴**	۳/۴۹**	۴۱۷/۹۸۴**	۱۴/۰۹۸**
خطا	۱۶	۰/۹۱۹	۰/۰۲۶	۳/۹۳۹	۰/۶۷۵

**** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ns عدم معنی‌داری**

ادامه جدول ۳-

متغیرها	درجه آزادی	برداشت کل هر گیاه	**فاکتور انتقال آرسنیک** از ریشه به برگ	نشت الکترولیتی	پراکسیداز
آرسنیک	۱	۵۸۴۱۲/۷۹۱**	۰/۲۳۶**	۲۹۹۹/۱۴۷**	۳۲۲۲/۴۸۴**
انواع کود زیستی	۳	۵۸۰/۶۳۸**	۰/۰۰۲**	۹۱/۷۴۶**	۱۴۳/۶۷۲**
آرسنیک×کود زیستی	۳	۵۸۰/۶۳۸**	۰/۰۰۲**	۸۷/۵۱۰**	۸۲/۸۹۲**
خطا	۱۶	۳/۶۹۹	۰/۰۰۰۳۳	۴/۲۳۱	۸/۴۱۲

**** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ns عدم معنی‌داری**

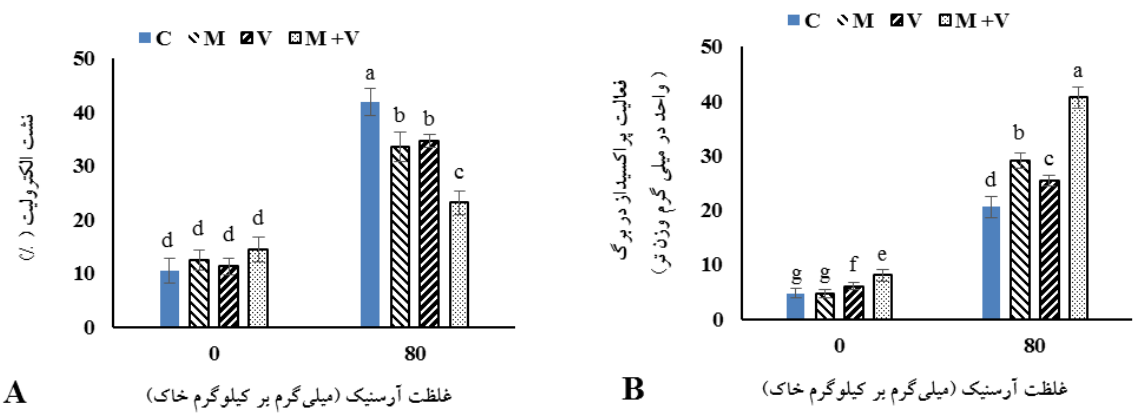
با قرار گرفتن در معرض ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک، غلظت آرسنیک در ریشه و برگ به ترتیب ۴۰/۹، ۹/۷۶ به دست آمد (جدول ۴). تیمار با ورمی‌کمپوست غلظت آرسنیک را در برگ ۲۸/۳ ٪ و در ریشه ۱۹/۸ ٪ کاهش داد. در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]
[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

جدول ۴- اثرات متقابل ورمی‌کمپوست و تلقیح با *R. intraradices* بر غلظت و تجمع کل آرسنیک در ریشه و برگ و فاکتور انتقال تحت تنش آرسنیک

آرسنیک خاک	کود زیستی	غلظت آرسنیک ریشه	غلظت آرسنیک برگ	تجمع کل آرسنیک در ریشه	تجمع کل آرسنیک در بخش هوایی	تجمع کل آرسنیک هر گیاه	فاکتور انتقال آرسنیک از ریشه به برگ
		(میکروگرم بر گرم وزن خشک)		(میکروگرم)			
۰	شاهد	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	میکوریز	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ورمی‌کمپوست	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ورمی‌کمپوست +میکوریز	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۸۰	شاهد	۴۰/۹±۱/۱۴^{b}	۹/۷۶±۰/۳^{a}	۴۱/۴۳±۰/۵۶^{d}	۳۱/۵۵±۱/۶۱^{c}	۷۲/۹۸±۲/۱۲^{d}	۰/۲۳۸±۰/۰۰۹^{a}
	میکوریز	۴۴/۷۵±۰/۳۹^{a}	۷/۹۸±۰/۱۲۶^{b}	۶۷/۷۱±۰/۷^{b}	۳۶/۵۴±۰/۵۶^{b}	۱۰۴/۲۵±۱/۰۹^{b}	۰/۱۷۹±۰/۰۰۸^{c}
	ورمی‌کمپوست	۳۲/۸±۰/۷^{d}	۶/۹۳±۰/۲۳۶^{c}	۶۰/۵۳±۱/۶۸^{c}	۳۶/۶۱±۱/۱^{b}	۹۷/۱۵±۲/۳۴^{c}	۰/۲۱۳±۰/۰۰۵^{b}
	ورمی‌کمپوست +میکوریز	۳۷/۲۳±۳/۳۲۷^{c}	۶/۲۵±۰/۲۱۷^{d}	۸۱/۵±۵/۲۷^{a}	۳۸/۷۸±۱/۱۲^{a}	۱۲۰/۲۹±۴/۳^{a}	۰/۱۵۳±۰/۰۱۱^{d}

تیمارهای دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد اختلاف معنی‌دار هستند.



شکل ۴- اثرمتقابل ورمی‌کمپوست (۸٪) و تلقیح با *R. intraradices* بر نشت الکترولیتی (A) و فعالیت پراکسیداز (B) در برگ گلرنگ تحت تنش ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک. تیمارهای دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد اختلاف معنی‌دار هستند. در روی نمودارها حروف C کنترل، M میکوریز،V ورمی‌کمپوست، و M+V تیمار ترکیبی میکوریز و ورمی‌کمپوست را معرفی می‌کند.

مقابل، تیمار خاک با میکوریز غلظت آرسنیک را در ریشه به میزان ۱۶ درصد افزایش داد (جدول ۴). به‌طور جالبی تجمع کل آرسنیک در ریشه و بخش هوایی و میزان برداشت کل هر گیاه در تیمار ورمی‌کمپوست به میزان ۴۶، ۱۶، ۳۲/۸ درصد و با میکوریز به میزان ۶۳، ۱۵/۸، ۴۳ ٪ و در تیمارهای ترکیبی به میزان ۹۷، ۲۳، ۶۴ ٪ افزایش یافت. اما تیمار خاک با ورمی‌کمپوست و تلقیح با میکوریز و همچنین تیمار ترکیبی (ورمی‌کمپوست + میکوریز)، به‌طور قابل‌توجهی فاکتور انتقال را کاهش داد. تیمار خاک با ورمی‌کمپوست، میکوریز و ترکیب آنها به ترتیب فاکتور انتقال را از ریشه به برگ به میزان ۱۰/۵، ۲۱/۴ و ۳۵/۷ درصد در گیاهان تحت تنش آرسنیک نسبت به تیمار آرسنیک تنها کاهش داد.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

اثر آرسنیک و کودهای زیستی بر نشت الکترولیتی و فعالیت آنزیم پراکسیداز: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل و متقابل آرسنیک و کودهای زیستی بر میزان نشت الکترولیتی و فعالیت پراکسیداز در برگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

افزودن ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک به ازای هر کیلوگرم خاک باعث افزایش محتوای نشت الکترولیتی، در برگ‌ها به میزان ۴۱/۸۶، و افزایش ۴/۵ برابر فعالیت آنزیم پراکسیداز در برگ گلرنگ در مقایسه با برگ گیاهان شاهد شد (شکل ۴). تیمار خاک با ورمی‌کمپوست و تلقیح با میکوریز و همچنین تیمار ترکیبی (ورمی‌کمپوست + میکوریز)، محتوای نشت الکترولیتی، در برگ‌ها را به ترتیب به میزان ۴۵، ۴۶/۱۱ و ۷۴ درصد کاهش داد و در مقابل فعالیت پراکسیداز به میزان ۱۲، ۲۳/۳ و ۴۱/۶ درصد در گیاهان تحت تنش در مقایسه با تیمار آرسنیک به تنهایی افزایش داد (شکل ۴).

بحث

در شرایط بدون تنش آرسنیک، کاربرد منفرد و ترکیبی ورمی‌کمپوست و میکوریز باعث بهبود بیوماس بخش هوایی و ریشه، ارتفاع و همچنین افزایش عملکرد دانه در گیاه گلرنگ شد (شکل ۱) که ممکن است به نقش ورمی‌کمپوست و میکوریز در بهبود عرضه مواد معدنی، به ویژه فسفر مربوط باشد. سطح بزرگتر سیستم ریسه‌های گسترده قارچ‌های میکوریزی می‌تواند به تأمین مواد معدنی و آب بیشتر برای گیاهان کمک کند (Begum *et al*., 2019). غنی‌سازی خاک با ورمی‌کمپوست هم می‌تواند تأمین مواد مغذی ضروری (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و آهن) را از طریق فرآیند کانی‌سازی و ایجاد یک محیط مناسب ریشه‌زایی به دلیل تحریک فعالیت میکروبی و بهبود ساختار هوادهی خاک تضمین کند. علاوه‌براین، اجزای فعال موجود در ورمی‌کمپوست مانند اسیدهای هیومیک و فولیک نیز مستقیماً باعث رشد می‌شوند (Joshi *et al*., 2015). امیدی و همکاران (۱۳۹۲) هم گزارش کردند که همزیستی با قارچ گلوموس ارتفاع، شاخه‌دهی، عملکرد بیولوژیکی، تعداد غوزه‌های فرعی، عملکرد دانه و درصد پروتئین دانه در گلرنگ را بهبود داد. صالحی و همکاران (۱۴۰۱) هم گزارش کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست اثر مثبت و معنی‌داری برتعداد گل در بوته، ارتفاع بوته، قطر ساقه، طول و عرض برگ، درصد روغن، میزان و نوع اسیدهای چرب گیاه گلرنگ تحت شرایط بدون تنش داشت. در این مطالعه، احتمالاً تأثیر میکوریز و ورمی‌کمپوست بر افزایش کلروفیل برگ (شکل ۲) منجر به افزایش کارایی فتوسنتزی و در نتیجه افزایش رشد و عملکرد دانه شده است (جدول ۴). به‌طور مشابه، افزایش محتوای کلروفیل و پارامترهای رشد قبلاً در استویای تلقیح‌شده با *R. intraradices* (Vafadar *et al*., 2013) و آویشن تیمارشده با ورمی‌کمپوست (Amooaghaie and Golmohammadi, 2017) در شرایط بدون تنش گزارش شده است.

نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک در کیلوگرم خاک، باعث کاهش رشد، عملکرد دانه (شکل ۱) و محتوای کلروفیل (شکل ۲) در گیاه گلرنگ شد که مشابه با گزارش محمدی و همکاران (۱۳۹۴) بود. آرسنیک بر جذب آب و مواد مغذی ضروری خصوصاً فسفر، اثر منفی دارد و متابولیسم پروتئین و فسفوریلاسیون اکسیداتیو و فتوسنتز را در گیاه کاهش می‌دهد و باعث پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی می‌شود و در نتیجه موجب کاهش رشد گیاه می‌شود (Chandrakar *et al*., 2016; Nabi *et al*., 2021). در این مطالعه افزایش نشت الکترولیت در برگ‌ها (شکل ۴– A) نشان می‌دهد که کاهش محتوای کلروفیل برگ‌های گلرنگ تحت تنش آرسنیک (شکل ۲) ممکن است نتیجه تنش اکسیداتیو القاشده با آرسنیک باشد که منجر به تجزیه زودهنگام کلروفیل می‌شود. کاربرد میکوریز و ورمی‌کمپوست با کاهش تنش اکسیداتیو (شکل ۴) به حفظ کلروفیل (شکل ۲) کمک کرد و در نتیجه موجب افزایش رشد گیاه شد. به‌طور مشابهی بهبود محتوای کلروفیل و رشد و محصول گندم تحت تنش کادمیوم به وسیله کاربرد ورمی‌کمپوست (Pan *et al*., 2022) و در گندم تحت تنش نیکل با تیمار میکوریز (Heydarian *et al*., 2018)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

گزارش شده است.

کاربرد ترکیبی میکوریز و ورمی‌کمپوست در هر دو شرایط بدون تنش و تحت تنش آرسنیک بهتر از تیمارهای منفرد رشد و عملکرد دانه را افزایش داد (شکل ۱) که دلالت بر اثر هم‌افزایی بین ورمی‌کمپوست و میکوریز بر رشد گیاه دارد. احتمالاً تأمین بیشتر مواد معدنی ضروری با ورمی‌کمپوست و سطح بزرگتر ریسه‌های قارچ برای جذب مواد معدنی و کاهش بیشتر آسیب تنش اکسیداتیو القاشده با آرسنیک، بیوسنتز و بقای کلروفیل و فتوسنتز را بهبود بخشید که به نوبه خود منجر به رشد و عملکرد دانه بهتر گیاه گلرنگ شد. پیشنهاد شده که برخلاف کودهای شیمیایی که تمایل گیاه به همزیستی با قارچ‌های میکوریزی را کاهش می‌دهند، آزادسازی آرام و پیوسته مواد مغذی از ورمی‌کمپوست، امکان کلونیزاسیون ریشه‌ها به وسیله قارچ‌های میکوریزی و استقرار آنها را افزایش می‌دهد. علاوه‌براین، ورمی‌کمپوست حاوی مقدار زیادی اسید هیومیک است که ممکن است رشد و توسعه ریسه‌های قارچ‌های میکوریزی را تحریک کند (Maji *et al*., 2017) که به نوبه خود باعث افزایش سطح جذب عناصر غذایی برای گیاه می‌شود. Perner و همکاران (۲۰۰۷) گزارش دادند که استفاده از کودهای آلی تأثیر همزیستی قارچ‌های میکوریزی بر رشد گیاه شمعدانی را تقویت کرد و به دلیل جذب بیشتر فسفر و نیتروژن، رشد گیاه را تقویت کرد.

افزودن آرسنیک به خاک باعث کاهش غلظت فسفر در برگ شده است (شکل ۳–A). آرسنیک از طریق سیستم‌های انتقال فسفات جذب می‌شود و به همین دلیل در رقابت با فسفر می‌تواند جذب فسفر در گیاهان را کاهش دهد و در نتیجه رشد و فرآیندهای زیستی گیاهان را به شدت مختل کند (Chandrakar *et al*., 2016). تلقیح قارچ‌های میکوریزی و تیمار خاک با ورمی‌کمپوست کمبود فسفر ناشی از آرسنیک را بهبود بخشید و غلظت آرسنیک را کاهش داد و در نتیجه باعث افزایش نسبت فسفر به آرسنیک در برگ گلرنگ شد (شکل ۳–B) که این ممکن است دلیل دیگری برای اثر این تیمارها برای بهبود رشد گیاه تحت تنش آرسنیک باشد. به‌طور مشابه، Chen و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که تلقیح با *Glomus mosseae* منجر به اثرات متضاد بر غلظت فسفر و آرسنیک در یونجه شد. ثابت شده است که تلقیح میکوریز فعالیت ناقلین فسفر با میل ترکیبی بالا، واقع در سلول‌های اپیدرمی ریشه را محدود می‌کند تا جذب آرسنیک را کاهش دهد اما جذب و انتقال فسفر از طریق هیف‌های قارچ میکوریزی به سلول‌های پوست ریشه باعث تأمین فسفر مورد نیاز گیاه می‌شود و در نتیجه نسبت فسفر به آرسنیک را در گیاهان افزایش می‌دهد (Christophersen *et al*., 2009). افزایش غلظت فسفر بخش هوایی با کاربرد ورمی‌کمپوست نیز می‌تواند به حضور فسفر و باکتری‌های معدنی‌کننده فسفر آلی در ورمی‌کمپوست نسبت داده شود یا ممکن است به افزایش رهاسازی فسفر از ترکیبات غیر آلی فسفر خاک به دلیل تأثیر ورمی‌کمپوست بر تحریک فعالیت باکتری‌های حل‌کننده فسفر در خاک مربوط باشد (Saha *et al*. 2010). بالاترین محتوای فسفر در هر دو شرایط عدم تنش و تنش آرسنیک در تیمار ترکیبی (شکل ۳–A) ثبت شد که احتمالاً مربوط به اثر هم افزایی بین این تیمارها بود.

همان‌طور که مورد انتظار بود با افزودن آرسنیک به خاک، غلظت آرسنیک در بخش هوایی و ریشه افزایش یافت. به‌طور جالبی تلقیح میکوریزی باعث افزایش تجمع آرسنیک در ریشه اما کاهش انتقال آرسنیک به برگ‌ها گیاهان تیمارشده با میکوریز و ترکیب میکوریز با ورمی‌کمپوست شد (جدول ۴). به احتمال زیاد، ریسه‌های قارچی سطح بزرگ‌تری را برای جذب آرسنیک در تیمارهای میکوریز و ترکیبی فراهم می‌کنند. مطالعه دیگری نشان داد که تلقیح با *R. irregularis* به‌طور قابل‌توجهی غلظت آرسنیک را در ریشه افزایش داد، اما غلظت آن در بخش هوایی برنج را کاهش داد (Li *et al*., 2016).

استفاده از ورمی‌کمپوست به تنهایی باعث کاهش قابل توجه غلظت آرسنیک در ریشه و برگ گلرنگ شد. این معمولاً به اتصال فلزات سنگین به مواد آلی در ورمی‌کمپوست نسبت داده می‌شود که به نوبه خود فراهمی زیستی فلز را در خاک کاهش می‌دهد و در نتیجه جذب و جابجایی فلزات سنگین در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

گیاهان را کاهش می‌دهد (Gul *et al.*, 2015). Sunitha و همکاران (۲۰۱۴) هم دریافتند که مواد آلی موجود در ورمی‌کمپوست یا کود مرغی به‌طور قابل‌توجهی تحرک و قابلیت دسترسی کروم در خاک و در نتیجه جذب و تجمع کروم در گیاه را کاهش و در نتیجه عملکرد ذرت را افزایش داد. به هر حال قابل توجه است که روند افزایشی محتوای کل آرسنیک در ریشه و بخش هوایی گلرنگ (جدول ۴) نشان می‌دهد که کاربرد ورمی‌کمپوست جذب کل آرسنیک را کاهش نداده و کاهش غلظت آرسنیک در ریشه و بخش هوایی احتمالاً به اثر رقت رشد مرتبط است. به عبارت دیگر، اگر چه ورمی‌کمپوست باعث افزایش تجمع کل آرسنیک در گلرنگ شد و توان گیاه‌پالایی گلرنگ را تقویت کرد اما چون تولید زیست‌توده را افزایش داد، کل آرسنیک برداشت شده توسط گیاه در زیست‌توده بیشتری توزیع شد. در نتیجه غلظت آرسنیک را در ریشه و بخش هوایی کاهش یافت و یک اثر رقت مرتبط با افزایش رشد رخ داد. این رقت، اثرات سمی آرسنیک را در بخش هوایی کاهش می‌دهد و به حفظ محتوای کلروفیل موجود در برگ و رشد و عملکرد دانه گیاه کمک می‌کند. در همین راستا، Wang و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند که ورمی‌کمپوست حاصل از کود خوک باعث تثبیت کادمیوم در خاک شد اما تولید زیست‌توده را افزایش داد و در نتیجه کارایی گیاه‌پالایی توسط *Sedum alfredii* را افزایش داد.

جالب توجه است که بیشترین تجمع کل آرسنیک در تیمارهای ترکیبی بدست آمد (جدول ۴)، در نتیجه غلظت کمتر آرسنیک در بخش هوایی، در تیمارهای ترکیبی را نیز می‌توان به عنوان "اثر رقت رشد" در نظر گرفت. به عبارت دیگر، اگر چه این تیمار غلظت آرسنیک را در ریشه و بخش هوایی کاهش داد، اما به دلیل تغذیه بهتر گیاه، افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه را چشمگیرتر بود و چون میزان تجمع آرسنیک از حاصلضرب غلظت آرسنیک در میزان زیست‌توده محاسبه می‌شود، این تیمار باعث افزایش تجمع کل آرسنیک در بوته و در نتیجه تقویت توان گیاه‌پالایی گلرنگ شد. داده‌های ما نشان می‌دهد که ورمی‌کمپوست و میکوریز به افزایش جذب کمک کرد و در نتیجه موجب افزایش ظرفیت تثبیت گیاهی آرسنیک در گیاهان گلرنگ شد اما این تیمارها مکانیسم‌های مؤثری را برای توقیف کردن آرسنیک در ریشه‌ها فعال کرد تا رشد بخش هوایی و تولید محصول کاهش پیدا نکند. معلوم شده است که برخی پروتئین‌های قارچی مثل گلومالین و یا گروه‌های کربوکسیل یا هیدروکسیل موجود در ساختار دیواره قارچ میکوریزی، توانایی کمپلکس‌کردن فلزات سنگین را دارند و در نتیجه ممکن است از انتقال فلز به بخش هوایی گیاه ممانعت کنند (Qiu *et al.*, 2022). به‌طور مشابه، Gomes و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که تیمار خاک با مواد آلی باعث کاهش محتوای آرسنیک در محلول خاک و بخش هوایی *Anadenanthera peregrina* شد و استفاده همزمان از قارچ‌های میکوریزی و مواد آلی منجر به بیشترین تجمع آرسنیک در ریشه و همچنین کمترین فاکتور انتقال آرسنیک در بخش هوایی شد و در نتیجه کاربرد ترکیبی میکوریز و مواد آلی به‌طور قابل‌توجهی کارایی تثبیت گیاهی را در این گیاه افزایش داد. از سوی دیگر افزایش فعالیت پراکسیداز (شکل ۴-B) و کاهش نشت الکترولیتی (شکل ۴-A) نشان می‌دهد که تأثیر مثبت میکوریز و ورمی‌کمپوست بر تحمل آرسنیک تنها به دلیل کاهش دسترسی به آرسنیک در خاک و کاهش جذب آرسنیک توسط گیاهان نیست و تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی ممکن است نقش مهمی در سم‌زدایی آرسنیک در گلرنگ داشته باشد. به‌طور مشابه، Alam و همکاران (۲۰۲۰) اعلام کردند که تیمار جداگانه قارچ‌های میکوریزی و بیوچار غلظت آرسنیک و محتوای مالون دی‌آلدئید را کاهش و فعالیت آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و کاتالاز را در نخودفرنگی افزایش دادند. رستمی و همکاران (۱۳۹۸) هم دریافتند که تلقیح قارچ میکوریز می‌تواند از طریق تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان باعث افزایش زیست‌توده و بهبود تحمل این گیاهان آفتابگردان و گلرنگ در برابر سمیت کادمیوم شد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، سمیت آرسنیک با کاهش محتوای کلروفیل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]
[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

(شکل ۲) و با ایجاد تنش اکسیداتیو و صرف انرژی برای فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، موجب کاهش انتقال فرآور ده‌های حاصل از فتوسنتز به دانه در حال پرشدن و در نهایت کاهش عملکرد دانه و رشد گیاهان شد و کاربرد ورمی‌کمپوست و میکوریز این شاخص‌ها را بهبود داد. علاوه بر این کاربرد توأم میکوریز و ورمی‌کمپوست بیش از تیمار جداگانه آنها باعث افزایش تحمل گیاهان شد و توان گیاه‌پالایی و ظرفیت تثبیت گیاهی آرسنیک را به دلیل افزایش زیست‌توده گیاهان افزایش داد. بنابراین، استفاده همزمان از ورمی‌کمپوست و میکوریز نه تنها رشد و بهبود عملکرد محصول می‌دهد، بلکه ممکن است یک استراتژی گیاه‌پالایی کارآمد، کم‌هزینه و کاربردی برای اصلاح خاک‌های آلوده به آرسنیک باشد. به هر حال، این اثرات باید در مطالعات آینده در سطح مزرعه‌ای بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

اطرشی، محمود، وفادار، فریناز، و عموآقایی، ریحانه (۱۳۹۴). اثر قارچ میکوریز و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه بر سرعت رشد، زمان گلدهی والگوی تجمع استویوزاید در گیاه استویا (*Stevia rebaudiana* Bert.). *دو ماهنامه علمی پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران*، ۳۱(۲)، ۲۳۴-۲۲۰.

امانی‌فر، ستاره، اصغرزاد، ناصرعلی، نجفی، نصرت‌اله، اوستان، شاهین، و بلندنظر، صاحبعلی (۱۳۹۱). اثر قارچ‌های میکوریز آربوسکولار بر گیاه‌پالایی سرب توسط سورگوم (*Sorghum bicolor* L.). *نشریه دانش آب و خاک*، ۲۲(۱)، ۱۵۵-۱۷۰.

امیدی، آرزو، میرزاخانی، محمد، و اردکانی، محمدرضا (۱۳۹۲). اثر همزیستی ازتوباکتر و میکوریز بر درصد پروتئین و برخی خصوصیات زراعی گلرنگ. *پژوهش¬های زراعی در حاشیه کویر*، ۱۰(۳)، ۲۲۰-۲۰۹.

حق‌شناس، رضا، شرفی، سوران، و قلی‌نژاد، اسماعیل (۱۳۹۹). تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و میکوریز بر عملکرد ارقام گلرنگ. *نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳(۲)، ۱۰۹-۹۱.

رستمی، رامین، دانشور، ماشاالله، اسماعیلی، احمد، و زاهدی، مرتضی (۱۳۹۸). تأثیر قارچ میکوریز بر پارامترهای رشدی و فیزیولوژیکی آفتابگردان و گلرنگ تحت تنش کادمیم. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۸(۳)، ۱۹۵-۲۰۵.

سالاری، حسن، عموآقایی، ریحانه، و مظفری، حسین (۱۴۰۳). مقایسه اثر دو نوع ورمی‌کمپوست بر آرسنیک قابل دسترس خاک، رشد و انباشت آرسنیک در گلرنگ (*Carthamus tinctorius*). انتشار آنلاین *مجله پژوهش‌های گیاهی* از تاریخ ۲۰ خرداد ۱۴۰۲.

عموآقایی، ریحانه، و بقایی، مریم (۱۳۹۳). اثر وابسته به غلظت ورمی‌کمپوست و عصاره آن بر جوانه‌زنی بذر و رشد رویشی سیاهدانه. *مجله پژوهش‌های گیاهی*، ۲۷(۴)، ۷۰۲-۶۹۱. DOR. 20.1001.1.23832592.1393.27.4.16.0.

فرج‌زاده، الناز، و اسدی، ملیحه (۱۳۹۸). بررسی سویه‌های قارچ میکوریز و مقادیر مصرف کود فسفره بر عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیک گلرنگ رقم فرامان. *فصلنامه اکوفیزیولوژی گیاهی*، ۳۸(۱۱)، ۱۰۲-۹۰.

صالحی، مهتاب. ملکی‌نیا، عاطفه و شهبازی، محدثه (۱۴۰۱). اثر کاربرد ورمی‌کمپوست و اسیدهیومیک بر برخی خصوصیات کمی و کیفی گلرنگ (*Carthamus tinctorius L.*). *فرآیند وکارکرد گیاهی*،۱۱(۵۱)، ۳۰۵-۲۹۵.

محمدی، سپیده، حیدری، مصطفی، دهمرده، مهدی، و اصغری، حمیدرضا (۱۳۹۴). تأثیر نیتروژن وآرسینک بر رنگدانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و مقادیر عناصر معدنی گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.). *نشریه تولید گیاهان زراعی*، ۸(۴)، ۱۲۰-۱۰۵.

Alam, M. Z., Hoque, M. A., Ahammed, G. J., & Carpenter-Boggs, L. (2020). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar, selenium, silica gel, and sulfur on arsenic uptake and biomass growth in *Pisum sativum* L. *Emerging Contaminants*, *6*, 312-322. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2020.08.001

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

Al Mamun, S., Shatabdi, S., Jannatara, F., Tanmoy, R. T., Md Abu-Sharif, Md Ferdous, A., Megan, R., & Balks, Z. P. (2021). Cadmium contamination in agricultural soils of Bangladesh and management by application of organic amendments: Evaluation of field assessment and pot experiments. *Environ Geochem Health, 43*, 3557-3582. https://doi: 10.1007/s10653-021-00829-x (012345

Amooaghaie, R. & Golmohammadi, S. (2017). Effect of vermicompost on growth, essential oil, and health of *Thymus vulgaris*. *Compost Science &Utilization, 25*, 166-177. tps://doi.org/10.1080/1065657X.2016.1249314

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science, 10*, 1068. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068

Chandrakar, V., Naithani, S. C., & Keshavkant, S. (2016). Arsenic-induced metabolic disturbances and their mitigation mechanisms in crop plants: A review. *Biologia, 71*, 367-377. https://doi.org/10.1515/biolog-2016-0052

Chen, B., Xiao, X., Zhu, Y. G., Smith, F. A., Xie, Z. M., &Smith, S. E. (2007). The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* gives contradictory effects on phosphorus and arsenic acquisition by *Medicago sativa* Linn. *Science of the Total Environment, 379*(2), 226-234.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.07.038

Christophersen, H. M., Smith, F. A., & Smith, S. E. (2009). Arbuscular mycorrhizal colonization reduces arsenate uptake in barley via downregulation of transporters in the direct epidermal phosphate uptake pathway. *New Phytologist, 184*, 962-974. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03009.x

Dhalaria, R., Kumar, D., Kumar, H., Nepovimova, E., Kuca, K., Islam, M. T., & Verma, R. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi as potential agents in ameliorating heavy metal stress in plants. *Agronomy, 10*, 815. https://doi.org/10.3390/agronomy10060815

Dionisio-Sese, M. L. & Tobita, S. (1998). Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science, 135*, 1-9. DOI: 10.1080/00103624.2017.1421645

Doerge, D. R., Divi, R. L., & Churchwell, M. I. (1997). Identification of the colored guaiacol oxidation product produced by peroxidases. *Analytical Biochemistry, 250*, 10-17. https://doi.org/10.1006/abio.1997.2191

Gomes, M. P., Moreira D. D., Silva Miranda, P. L., Carvalho Barreto, L., Matheus, M. T., &Garcia, Q. S. (2012). The effects of arsenic on the growth and nutritional status of *Anadenanthera peregrina*, a Brazilian savanna tree. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 175*(3), 466-473.https://doi.org/10.1002/jpln.201100195

Gul, S., Naz, A., Fareed, I., & Irshad, M. (2015). Reducing heavy metals extraction from contaminated soils using organic and inorganic amendments—a review. *Polish Journal of Environmental Studies, 24*, 1423-1426. DOI: 10.15244/pjoes/26970.

Heidari, J., Amooaghaie, R. & Kiani, S. (2020). Impact of chitosan on nickel bioavailability in soil, the accumulation and tolerance of nickel in *Calendula tripterocarpa*. *International Journal of Phytoremediation*, *22*(11), 1175-1184. https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1748564

Heydarian, A., Tohidi, H. R., Donath, T. W., & Sohrabi, M. (2018). Study of effect of arbuscular mycorrhiza (*Glomus intraradices*) fungus on wheat under nickel stress. *Agronomy Research, 16*(4), 1660-1667. http://dx.doi.org/10.15159/ar.18.167

Hoehne, L., De Lima, C. V., Martini, M. C., Altmayer, T., Brietzke, D. T., Finatto, J., Gonçalves, T. E., & Granada, C. E. (2016). Addition of vermicompost to heavy metal-contaminated soil increases the ability of black oat (*Avena strigosa* Schreb) plants to remove Cd, Cr, and Pb. *Water, Air, & Soil Pollution, 227*, 1-8. https://doi.org/10.1007/s11270-016-3142-2

Joshi, R., Singh, J., & Vig, A. P. (2015). Vermicompost as an effective organic fertilizer and biocontrol agent: Effect on growth, yield and quality of plants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 14*, 137-159. https://doi.org/10.1007/s11157-014-9347-1

Lichtenthaler, H. K. & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions, 11*, 591-592. https://doi.org/10.1042/bst0110591

Li, H., Chen, X. W., & Wong, M. H. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi reduced the ratios of inorganic/organic arsenic in rice grains. *Chemosphere, 145*, 224-230. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.10.067

Maji, D., Misra, P., Singh, S., & Kalra, A. (2017). Humic acid rich vermicompost promotes plant growth by improving microbial community structure of soil as well as root nodulation and mycorrhizal colonization in the roots of *Pisumsativum*. *Applied Soil Ecology, 110*, 97-108. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.10.008

Makkar, C., Singh, J., Parkash, C., Singh, S., Vig, A. P., & Dhaliwal, S. S., (2022). Vermicompost acts as bio-modulator for plants under stress and non-stress conditions. *Environment, Development and Sustainability*, *25*, 2006-2057. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02132-w

Nabi, A., Naeem, M., Aftab, T., Khan, M. M. A., & Ahmad, P. (2021). A comprehensive review of adaptations in plants under arsenic toxicity: Physiological, metabolic and molecular interventions. *Environmental Pollution, 290*, 118029. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118029

Pan, P., Liu, B., Wu, L., Lin, B., & Li, Q. (2022). Optimal remediation strategies for simultaneously immobilizing arsenic and cadmium using combination of vermicompost and zero-valent iron in two soil types. *Environmental*

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

Technology & Innovation, *28*, 102807. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102807

Perner, H., Schwarz, D., Bruns, C., Mader, P., & George, E. (2007). Effect of arbuscular mycorrhizal colonization and two levels of compost supply on nutrient uptake and flowering of pelargonium plants. *Mycorrhiza*, *17*, 469-474. https://doi.org/10.1007/s00572-007-0116-7

Qiu, L., Lin, H., Song, B., Kong, T., Sun, W., Sun, X., Zhang, Y., & Li, B. (2022). Glomalin-related soil protein (GRSP) in metal sequestration at Pb/Zn-contaminated sites. *Journal of Soils and Sediments*, *22*, 577-593. https://doi.org/10.1007/s11368-021-03092-w

Saha, N., Chattrejee, P., Sharma, A., Metiya, G., Halder, M., & Mukherjee, D. (2010). Vermicomposting influences phosphorus microbiology leading to phosphorus enrichment in end product. *International Journal of Global Environmental*, *10*, 310-326. https://doi.org/10.1504/IJGENVI.2010.037273

Solmaz, Y., Adiloglu, S., Belliturk, K., Adiloglu, A., Zahmacioglu, A., & Kocabas, A. (2017). Effect of the various doses of vermicompost implementation on some heavy metal contents (Cr, Co, Cd, Ni, Pb) of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Eurasian Journal of Forest Science*, *5*(1), 29-34. DOI: 10.31195/ejejfs.327363

Sunitha, R., Mahimairaja, S., Bharani, A., & Gayathri, P. (2014). Enhanced phytoremediation technology for chromium contaminated soils using biological amendments. *International Journal of Science and Technology*, *3*(3), 153-162.

Vafadar, F., Amooaghaie, R., & Otroshy, M. (2013). Effects of plant-growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungus on plant growth, sativoside, NPK, and chlorophyll content of *Stevia rebaudiana*. *Journal of Plant Interaction*, *9*, 128-136 https://doi.org/10.1080/17429145.2013.779035

Wang, K., Zhang, J., Zhu, Z., Huang, H., Li, T., He, Z., Yang, X., & Alva, A. (2012). Pig manure vermicompost (PMVC) can improve phytoremediation of Cd and PAHs co-contaminated soil by *Sedum alfredii*. *Journal of Soils and Sediments*, *12*, 089-1099. https://doi.org/10.1007/s11368-012-0539-4

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]

Impact of AFM and vermicompost on morphophysiological attributes, seed yield and Arsenic phytoremediation ability in safflower (*Carthamus tinctorius* L.)

Hassan Salari[1,2], Rayhaneh Amooaghaie[*1], Hossein Mozafari[2]

[1] Plant Biology Department, Science Faculty, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
[2] Ecology Department, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran
(Received: 2024/02/26, Accepted: 2023/11/04)

Abstract

The impact of mycorrhizal inoculation (M) and vermicompost (V) on heavy metal tolerance and phytoremediation ability has been proven, but the studies concerning the combined effect of M and V in this context are limited. Therefore, a greenhouse experiment was conducted to study the single and combined effects of 8% V and inoculation with *Rhizophagus intraradices* on physiological attributes and arsenic (As) accumulation in safflower. Plants grown under 0 and 80 mg kg^{-1} As in soil. According to the ANOVA analysis, the interactive effect of M and V was significant for the most attributes. The mean comparison of data also showed that the combined treatment more efficiently than single application of V of M improved the dry weight of roots and shoots, Chl *a*, *b*, seed yield, P concentration, and P:As ratio in leaves under both non-stress and As stress. In addition, the co-application was better than a single amendment with M and V because it decreased EL levels, As concentration in leaves, and TF but increased total As accumulation in plants and POD activity in leaves of As-stressed plants. The results of this research revealed that even though co-application of M and V is strengthening the phytoremediation ability owing to the increase in dry weight of shoots and roots, it is moderating As toxicity due to the growth dilution effect and consequently improving seed yield.

Keywords: Chlorophyll, Growth dilution effect, P concentration, Total As accumulation, Translocation factor

Corresponding author, Email: rayhanehamooaghaie@yahoo.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-12-31]

[DOI: DOI: 10.22034/13.62.161]