

ارزیابی اثر قارچ مایکوریزا و محلول پاشی سولفات روی بر برخی صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد اقتصادی گیاه گل‌راعی (*Hypericum perforatum* L.) تحت رژیم‌های آبیاری متفاوت

گودرز باقری فرد^۱، امین صالحی*^۱ محسن موحدی دهنوی^۱، محمد صدقی اصل^۱ و علیرضا یدوی^۲

^۱ گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

^۲ گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۱/۰۲)

چکیده

گل‌راعی (*Hypericum perforatum* L.) گیاهی دارویی با قدمت بیش از ۲۰۰۰ سال است. تنش خشکی از محدودکننده‌ترین عوامل محیطی در رشد و تولید گیاهان است. همزیستی گیاهان با قارچ‌های مایکوریزا و محلول پاشی عناصر ضروری می‌تواند یکی از راه‌کارهای مؤثر برای مقابله با تنش خشکی باشد. این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر قارچ مایکوریزا و محلول پاشی سولفات روی بر برخی صفات بیوشیمیایی و عملکرد اقتصادی در گل‌راعی تحت رژیم‌های آبیاری متفاوت به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ اجرا شد. عامل اصلی رژیم‌های آبیاری در سه سطح (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی) و عامل فرعی به صورت فاکتوریل شامل محلول پاشی با سولفات روی در سه سطح (صفر، ۳ و ۶ در هزار) و تلقیح با مایکوریزا (*Funneliformis mosseae*) در دو سطح (تلقیح شده و تلقیح نشده) انجام شد. نتایج نشان داد، که برهمکنش سه‌گانه رژیم‌های آبیاری + محلول پاشی + مایکوریزا در هر سه سال اثری معنی‌دار بر محتوای کلروفیل، پرولین، قندهای محلول، مالون دی‌آلدهید و عملکرد اقتصادی داشت. افزایش تنش آبیاری اثری کاهنده بر محتوای کلروفیل، عملکرد اقتصادی و محتوای آب نسبی برگ داشت، اما بر پرولین، قندهای محلول و مالون دی‌آلدهید اثری افزایشی داشت. در هر سطح تنش بیشترین عملکرد اقتصادی در تیمار ۶ در هزار محلول پاشی + تلقیح با مایکوریزا حاصل شد. به‌طور کلی محلول پاشی روی + مایکوریزا با افزایش محتوای کلروفیل، قندهای محلول و محتوای آب نسبی برگ سبب تعدیل شرایط تنش و افزایش مقاومت گیاه در برابر خشکی شد و با ارتقاء کمی و کیفی صفات بیوشیمیایی، عملکرد اقتصادی گیاه گل‌راعی را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: پرولین، تنش خشکی، کلروفیل، *Hypericum perforatum*

مقدمه

سراسر جهان پراکنش وسیعی دارد (Sun et al., 2018) و قرن‌ها است، که به‌عنوان یک گیاه دارویی ضدالتهاب، ضداسردگی، ضد درد با اثرات مدر و آرام‌بخش مورد استفاده

گل‌راعی (*Hypericum perforatum* L.) از خانواده هایپریریکاسه (Hypericaceae)، گیاه دارویی چند ساله علفی است، که در

گیاهان تلقیح شده و تلقیح نشده با قارچ مایکوریزا شد، اما تلقیح با قارچ مایکوریزا در کاهش اثرات نامطلوب تنش آبی بسیار مؤثرتر بود (Pirzad and Mohammadzadeh, 2018).

گیاهان در شرایط محیطی متفاوت، برای تنظیم پتانسیل اسمزی درون سلول، مواد محلول با وزن مولکولی کم و سازگار را تولید و انباشته می‌کنند. این مواد عموماً شامل اسیدهای آمینه، قندهای محلول واسیدهای آلی هستند، که در بین آنها احتمالاً پرولین گسترده‌ترین نوع اسمولیت است (امیدی و همکاران، ۱۳۹۰). پرولین یک شاخص قابل اطمینان برای مطالعه اثر تنش‌های محیطی در گیاهان است (Claussen, 2005). محققین زیادی نیز به نقش قندهای محلول در حفاظت سلول‌ها در برابر تنش‌ها اشاره کرده‌اند (Finkelstein and Gibson, 2001; Yamada and Osakabe, 2018; Karimi et al., 2012). محتوای کلروفیل و فتوسنتز نیز طی تنش خشکی کاهش می‌یابد (Begum et al., 2019)، زیرا کلروفیل در کلروپلاست تجزیه و ساختارهای تیلاکوئید ناپدید و اکسیژن فعال تولید می‌شود (Samira et al., 2020). درحالی‌که در گیاهان مایکوریزایی تحت تنش خشکی محتوای کلروفیل افزایش می‌یابد (Hazzoumi et al., 2015).

کاربرد روی نیز از جمله راهکارهای کاهش تنش خشکی است. ریزمغذی روی در سنتز کربوهیدرات و سوخت‌وساز پروتئین و اسیدهای آمینه از جمله پرولین نقش اساسی دارد (Kobraee et al., 2011). سولفات روی در تأمین و ایجاد تعادل بین عناصر غذایی بسیار مؤثر است و به تنهایی یا در ترکیب با رژیم‌های آبیاری معین می‌تواند در بهبود عملکرد گیاه تأثیر مثبتی داشته باشد (ریاضی و همکاران، ۱۳۹۵).

پیش‌بینی می‌شود که تغییرات آب‌وهوایی اثرات خشکسالی را در آینده تشدید کند، که هم بر تولید محصول و هم بر تنوع زیستی گیاهی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، درک عمیق مکانیسم‌های سازگاری گیاه با تنش خشکی به عنوان یکی از تنش‌های مهم غیرزیستی، که بر رشد گیاهان تأثیر می‌گذارد، برای غلبه بر چالش‌های آینده ضروری است.

لذا با توجه به قرارگیری کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک جهان، این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر همزمان

بوده است (Zirak et al., 2019; Barnes et al., 2001). اکنون نیز به عنوان دارویی مؤثر برای پیشگیری و درمان افسردگی (Benitez et al., 2022)، سرطان (Menegazzi et al., 2021)، سوختگی‌ها و زخم‌ها (Isacchi et al., 2007) و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در میان گونه‌های Hypericum گونه *Hypericum perforatum* مشهورترین گونه است (Coste et al., 2020)، اما مطالعات اندکی در مورد تأثیر شرایط مطلوب و نامطلوب محیطی بر روی آن وجود دارد. با افزایش تقاضا برای محصولات طبیعی نشأت‌گرفته از گیاهان دارویی و معطر، کشت این گونه‌های گیاهی مورد توجه قرار گرفته است.

تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل غیرزیستی محدودکننده رشدونمو گیاهان است، که همه جنبه‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و به‌طور قابل‌توجهی رشد گیاهان را کاهش می‌دهد (Pitman and Lauchli, 2002). یکی از راهکارهای مقابله با تنش خشکی همزیستی با قارچ مایکوریزای آربوسکولار (Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF) است. قارچ مایکوریزا یکی از بازیگران مهم در اکوسیستم است و نقش مهمی در مبارزه با تنش‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی دارد (Bennett and Classen, 2020). در گیاهان همزیست با قارچ مایکوریزای آربوسکولار گسترش ریشه‌های قارچی، موجب افزایش هدایت روزنه‌ای، هدایت هیدرولیکی ریشه‌ها (Zhang et al., 2018)، جذب بیشتر آب در شرایط رطوبتی کم، تعادل اسمزی، فعالیت فتوسنتزی، تجمع کربوهیدرات‌ها و پرولین (Deepika and Kothamasi, 2015) و در نهایت افزایش رشد و تجمع زیست‌توده، تحت شرایط تنش خشکی می‌گردد (Chandrasekaran, 2022). قارچ مایکوریزای آربوسکولار همچنین کربن و لیپیدها را از گیاه دریافت می‌کند و در مقابل به‌دست آوردن مواد مغذی، جذب آب و مواد معدنی کمیاب را برای گیاه تسهیل می‌کند (Bennett and Classen, 2020). در تحقیقی بر گیاهان اسطوخودوس، رزماری و آویشن (*Lavandula officinalis*, *Rosmarinus officinalis* and *Thymus vulgaris*) تحت رژیم‌های آبیاری مختلف، گزارش شد، که تنش خشکی باعث کاهش عملکرد اقتصادی

کاربرد خاکی قارچ مایکوریزا و محلول پاشی سولفات روی بر برخی صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد اقتصادی گیاه گل راعی تحت رژیم‌های متفاوت آبیاری در شهرستان بویراحمد انجام شد، تا با بررسی برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی و ارتباط این پاسخ‌ها با عملکرد اقتصادی در شرایط تنش خشکی، گام مثبتی در جهت توسعه و تولید پایدار گیاه دارویی با ارزش گل راعی در منطقه مورد مطالعه برداشته شود.

مواد و روش‌ها

مشخصات طرح و تیمارهای آزمایش: این پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی چم‌خانی یاسوج در استان کهگیلویه و بویراحمد در فاصله ۵ کیلومتری جنوب غربی شهر یاسوج، با مختصات UTM 549635E, 339679N و ارتفاع ۱۷۳۰ متر از سطح دریا تحت رژیم‌های آبیاری 39R و متفاوت در سه سال زراعی متوالی (۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰) به صورت اسپلیت فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی رژیم‌های آبیاری متفاوت در سه سطح؛ بدون تنش (آبیاری با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبیاری گیاه)، تنش ملایم (آبیاری با تأمین ۷۵ درصد نیاز آبیاری گیاه) و تنش شدید (آبیاری با تأمین ۵۰ درصد نیاز آبیاری گیاه) و عامل فرعی به صورت فاکتوریل شامل تلقیح با مایکوریزا (*Funneliformis mosseae*) در دو سطح (بدون قارچ و با قارچ) و محلول پاشی با منبع سولفات روی ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) در سه سطح (صفر، ۳ و ۶ قسمت در هزار) بود. در این آزمایش کود زیستی مایکوریزا طبق دستور شرکت سازنده (کلینیک گیاه پزشکی ارگانیک همدان، با تعداد ۱۲۰ اسپور زنده در هر گرم بستر خاک) در حین انجام عملیات خاکورزی ثانویه به صورت مایع تلقیح با آغشته کردن ریشه‌ها در بستر کاشت و محلول پاشی با سولفات روی همزمان با شروع تنش خشکی (دو هفته پس از استقرار گیاهچه‌ها در سال اول و شروع اولین آبیاری در سال‌های دوم و سوم) به میزان نیم لیتر در هر مترمربع مورد استفاده قرار گرفت.

برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در آزمایشگاه، پیش از عملیات کاشت و در حین آماده‌سازی زمین نمونه‌هایی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری به طور تصادفی برداشت و آزمایش شد (جدول ۱). پس از شخم، تسطیح و ایجاد جوی و پشته، زمین به ۵۴ کرت جداگانه به ابعاد $۳/۵ \times ۲/۵$ متر تقسیم شد. در هر کرت پنج پشته با فواصل مساوی ایجاد شد. برای به حداقل رساندن خطاها و اثر حاشیه‌ای، فاصله بین بلوک‌ها ۳ متر، فاصله بین کرت‌های اصلی (تیمار آبیاری) دو متر و کرت‌های فرعی یک متر از همدیگر در نظر گرفته شد. نشاء مورد نیاز از رقم توپاز تهیه و با فاصله ۲۵ سانتی‌متری روی ردیف‌ها (با تراکم هشت بوته در هر مترمربع) در تاریخ مناسب (اواخر اردیبهشت‌ماه) کاشته شد. عملیات تلقیح قارچ فقط در سال اول و همزمان با کاشت نشاءها انجام شد. محلول پاشی با سولفات روی در سطوح پیشنهادی در هر سه سال همزمان با شروع تنش آبیاری انجام شد. عمل وجین علف‌های هرز به صورت دستی در دو مرحله؛ ۲۰ و ۴۰ روز بعد از کاشت و در سال‌های دوم و سوم متناسب با نیاز انجام شد. روش آبیاری به صورت نوار تیپ قطره‌ای و آبیاری هر هفت روز یک بار و با نصب کنتور حجمی بر اساس تیمارهای بیان شده انجام گرفت.

تعیین نیاز آبی گیاه: به منظور اعمال سطوح مختلف تنش آبیاری، نیاز آبی گیاه از مدل نرم‌افزاری CROPWAT ارائه شده توسط Allen et al. (۱۹۹۲) و Smith, FAO (۲۰۰۴) با استناد به روش Allen et al. (۱۹۹۸) محاسبه شد (اکبرزاده مقدم سه قلعه، و مطلبیان، ۱۳۸۹). داده‌های هواشناسی منطقه شامل دمای حداقل و حداکثر، مقدار بارندگی، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی در یک دوره درازمدت سی ساله، از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک فرودگاه یاسوج (در فاصله دو کیلومتری محل اجرای طرح) اخذ و لحاظ شد.

اندازه‌گیری محتوای کلروفیل کل: اندازه‌گیری کلروفیل کل با روش Arnon (۱۹۴۹) از طریق نمونه‌گیری تصادفی از برگ‌های بالغ و عصاره‌گیری با استون انجام شد. جذب نور توسط دستگاه اسپکتوفتومتر مدل Lambada Ez 210 در

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک

Texture	Sand	Silt	Clay	N (%)	O.C (%)	T.N.V (%)	SP (%)	pH	E.C ۱۰ ^۳ ×	K, P, Cu, Mn, Fe, Zn (ppm)					
										K	P	Cu	Mn	Fe	Zn
Cl-L	۲۲	۴۲	۳۶	۱۱۹/۰	۲۰۴/۱	۰/۱۶	۲۳/۵۷	۶/۷	۶۳۴/۰	۴۱۲	۲۵/۱۲	۸۴/۱	۵/۷	۵/۱۲	۸/۰

درصد و تیوباریتوریک اسید (TBA) ۰/۵ درصد عصاره‌گیری شدند. سپس محتوای MDA توسط اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری و بیان شد.

اندازه‌گیری محتوای آب نسبی برگ (RWC): جهت

اندازه‌گیری محتوای آب نسبی برگ از روش Irigoyen و همکاران (۱۹۹۲) استفاده شد. ابتدا وزن تر (FW) برگ‌های کاملاً بالغ بلافاصله پس از جمع‌آوری اندازه‌گیری شد، سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر قرار داده شدند. بعد رطوبت سطحی برگ‌ها با کاغذ صافی گرفته شد و وزن آماس (TW) محاسبه شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک (DW)، برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و در نهایت RWC با استفاده از رابطه (۴) تعیین شد (Mishra and Choudhuri, 1999).

رابطه (۴)

$$RWC\% = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100$$

عملکرد اقتصادی گیاه: به منظور اندازه‌گیری عملکرد

اقتصادی گیاه در مرحله گلدهی کامل، بوته‌های موجود در هر کرت پس از حذف اثرات حاشیه‌ای در یک مترمربع از مساحت کرت و از ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری سطح زمین برداشت و نمونه‌ها جهت حفظ کیفیت برگ و گل‌های برداشت‌شده در دمای محیط (میانگین ۲۵±۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۶ ساعت)، در سایه و به دور از تابش مستقیم نور خورشید خشک، سپس با ترازوی دیجیتالی وزن و بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شدند (Stuart and Wills, 2003).

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS

صورت گرفت. ابتدا آزمون نرمال بودن داده‌ها برای تعداد سال‌های برداشت‌شده انجام و سپس آزمون بارتلت اجرا شد. با توجه به اینکه نتایج آزمون بارتلت صفات مورد مطالعه معنی‌دار شد، تجزیه مرکب صورت نگرفت و هر سال آزمایش

طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر انجام شد. در نهایت، غلظت ترکیبات ذکرشده در بالا با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد.

رابطه (۱)

$$Chl\ a = \frac{(12.7 \times OD_{663}) - (2.69 \times OD_{645}) \times V}{(1000 \times W)}$$

رابطه (۲)

$$Chl\ b = \frac{(22.9 \times OD_{645}) - (4.68 \times OD_{663}) \times V}{(1000 \times W)}$$

رابطه (۳)

$$Chl\ a+b = \frac{(8.02 \times OD_{663}) + (20.2 \times OD_{645}) \times V}{(1000 \times W)}$$

که در آن V، OD، W، Chl a و Chl b به ترتیب حجم نمونه، میزان جذب، وزن تازه نمونه، کلروفیل a و b است.

اندازه‌گیری پرولین برگ: میزان پرولین با استفاده از روش

Murillo-Amador و همکاران (۲۰۱۴) برآورد شد. بعد از تهیه عصاره الکلی از برگ‌های فریزشده (در دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد) و افزودن نین‌هیدرین به عصاره الکلی و طی مراحل جوشاندن، خنک‌کردن، و افزودن تولوئن، غلظت پرولین با اسپکتروفتومتر مدل Lambda Ez 210 در طول موج ۵۲۰ نانومتر و با توجه به منحنی استاندارد تعیین شد.

اندازه‌گیری فندهای محلول کل: فندهای محلول کل با

استفاده از روش Zan و همکاران (۲۰۰۷) تعیین شد. در این روش با افزودن آنترون تازه تهیه‌شده (۱۵۰ میلی‌گرم آنترون + ۱۰۰ میلی‌لیتر H₂SO₄ ۷۲ درصد) به عصاره الکلی و بعد از گذاشتن محلول در حمام آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه و سرد کردن، غلظت TSS در طول موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر مدل Lambda Ez 210 و گلوکز به عنوان استاندارد تعیین شد.

اندازه‌گیری فعالیت مالون دی‌آلدئید (MDA): فعالیت

MDA براساس روش پیشنهادی Heath و Packer (۱۹۶۸) تعیین شد. نمونه‌ها در اسید تری‌کلرو استیک (TCA) ۰/۱

می‌تواند، در اثر افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلز باشد (Sreenivasulu *et al.*, 2012). همچنین مطابق با نتایج این آزمایش، پژوهش‌های انجام‌شده در سایر گیاهان نیز نشان داد، که تلقیح با مایکوریزا محتوای کلروفیل برگ را افزایش می‌دهد (ایلخان و همکاران، ۱۴۰۲؛ Abdi *et al.*, 2021; Hazzoumi *et al.*, 2015). افزایش محتوای کلروفیل تحت همزیستی ریشه گیاه با قارچ مایکوریزا را می‌توان به اثر مثبت این قارچ در جذب عناصر غذایی مورد نیاز از قبیل نیتروژن و منیزیم (Begum *et al.*, 2019) و تأثیر مثبت مایکوریزا در کاهش تنش اکسیداتیو و حفظ محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی (Kaya *et al.*, 2001) و بالابودن جذب فسفر به عنوان یک حامل انرژی طی فرایند فتوسنتز نسبت داد. اگر چه روی به‌طور مستقیم بر تشکیل کلروفیل مؤثر نیست، اما بر غلظت عناصر غذایی درگیر در تشکیل کلروفیل یا عناصری مانند آهن و منیزیم، که قسمتی از مولکول کلروفیل محسوب می‌شوند، مؤثر است (Kaya and Higgs, 2002). نتایج بررسی‌ها نیز نشان می‌دهد، که همبستگی مثبتی بین روی و میزان کلروفیل برگ گیاهان وجود دارد (Zarrouk *et al.*, 2005). همچنان که در گزارش اصل محمدی و همکاران (۱۴۰۰) محلول‌پاشی روی سبب افزایش کلروفیل کل در گیاه آویشن شده است.

پرویلین: برهمکنش سه‌گانه رژیم آبیاری، محلول‌پاشی سولفات روی و قارچ مایکوریزا در سال‌های اول و دوم در سطح ۵ درصد و در سال سوم در سطح ۱ درصد بر میزان پرویلین در گیاه گل‌راعی معنی‌دار شد (جدول ۲)، نتایج مقایسه میانگین برهمکنش محلول‌پاشی سولفات روی و قارچ مایکوریزا در هر سطح رژیم آبیاری برای میزان پرویلین در گیاه گل‌راعی بیانگر آن بود که، در هر سه سال بیشترین مقدار پرویلین در تیمار شاهد محلول‌پاشی و بدون تلقیح با مایکوریزا و کمترین مقدار آن در تیمار محلول‌پاشی ۶ در هزار سولفات روی + تلقیح با قارچ مایکوریزا به دست آمده است. بر اساس نتایج، افزایش تنش آبیاری در هر سه سال باعث افزایش پرویلین در گیاه گل‌راعی شده است، ولی محلول‌پاشی روی + تلقیح با قارچ مایکوریزا در هر سطح آبیاری میزان پرویلین را

به عنوان یک چین جداگانه تجزیه و تحلیل شد. مقایسه میانگین اثر اصلی براساس آزمون LSD در سطح پنج درصد و مقایسه میانگین‌های برهم‌کنش با استفاده از رویه L.S.Means انجام شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel طراحی شد.

نتایج و بحث

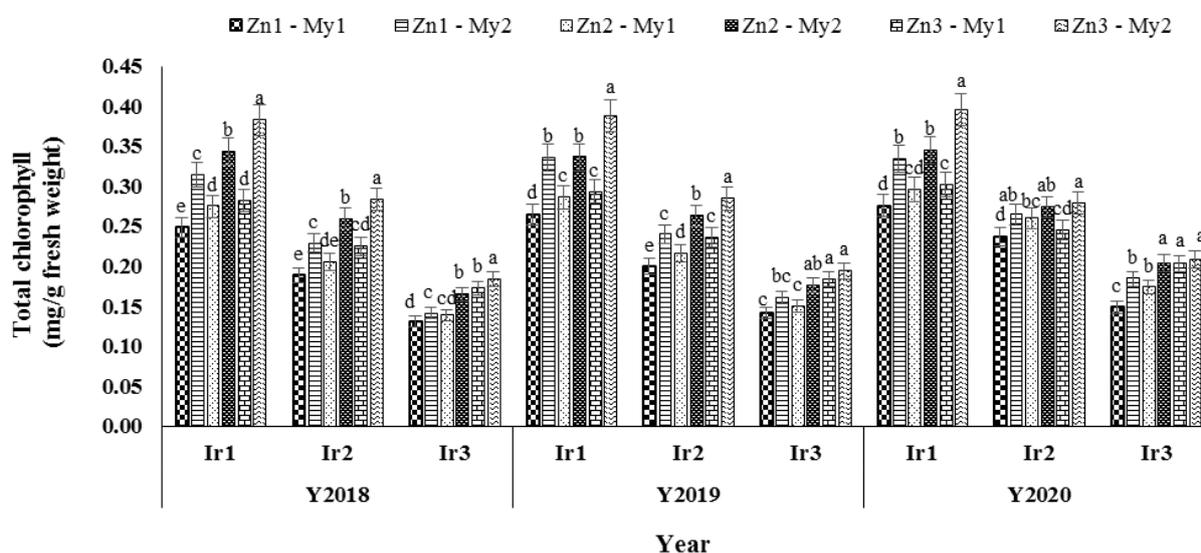
محتوای کلروفیل کل: برهمکنش سه‌گانه رژیم آبیاری، محلول‌پاشی سولفات روی و قارچ مایکوریزا در سال اول در سطح ۵ درصد و در سال‌های دوم و سوم در سطح ۱ درصد بر محتوای کلروفیل در گیاه گل‌راعی معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش محلول‌پاشی سولفات روی و قارچ مایکوریزا در هر سطح از رژیم آبیاری برای محتوای کلروفیل در گیاه گل‌راعی نشان داد، در هر سه سال بیشترین مقدار کلروفیل در تیمار محلول‌پاشی ۶ در هزار سولفات روی + تلقیح با قارچ مایکوریزا و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد محلول‌پاشی و بدون تلقیح با مایکوریزا به دست آمد. بر اساس نتایج، افزایش تنش آبیاری موجب کاهش محتوای کلروفیل کل گردید، ولی محلول‌پاشی روی + تلقیح با قارچ مایکوریزا در هر سه سال در هر سطح تنش سبب افزایش کلروفیل در گیاه گل‌راعی شد (شکل ۱).

نتایج حاصل از بررسی حاضر با نتایج بررسی‌های انجام‌شده در گیاهان سرخارگل (*Echinacea purpurea*) (Attarzadeh *et al.*, 2019) آویشن باغی (*Thymus vulgaris*) (Begum *et al.*, 2019)، آویشن دناپی (*Thymus daenensis*) (Alavi-Samani *et al.*, 2013; Emami Bistgani *et al.*, 2017) و گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۹) تحت تنش آبی همسو بود. کاهش محتوای کلروفیل یکی از مهم‌ترین پاسخ‌های فیزیولوژیکی در مقابل تنش خشکی است. به‌نظر می‌رسد، که کاهش میزان کلروفیل در اثر تنش خشکی، به‌علت افزایش تولید رادیکال‌های اکسیژن باشد، که این رادیکال‌های آزاد باعث پراکسیداسیون این رنگیزه می‌گردد (Zhang *et al.*, 2018). برخی از محققین عقیده دارند که کاهش غلظت کلروفیل در اثر افزایش تنش خشکی

جدول ۲- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس کلروفیل کل و پرولین در گیاه گل راعی تحت تأثیر رژیم های آبیاری، محلول پاشی سولفات روی و کاربرد خاکی قارچ مایکوریزا

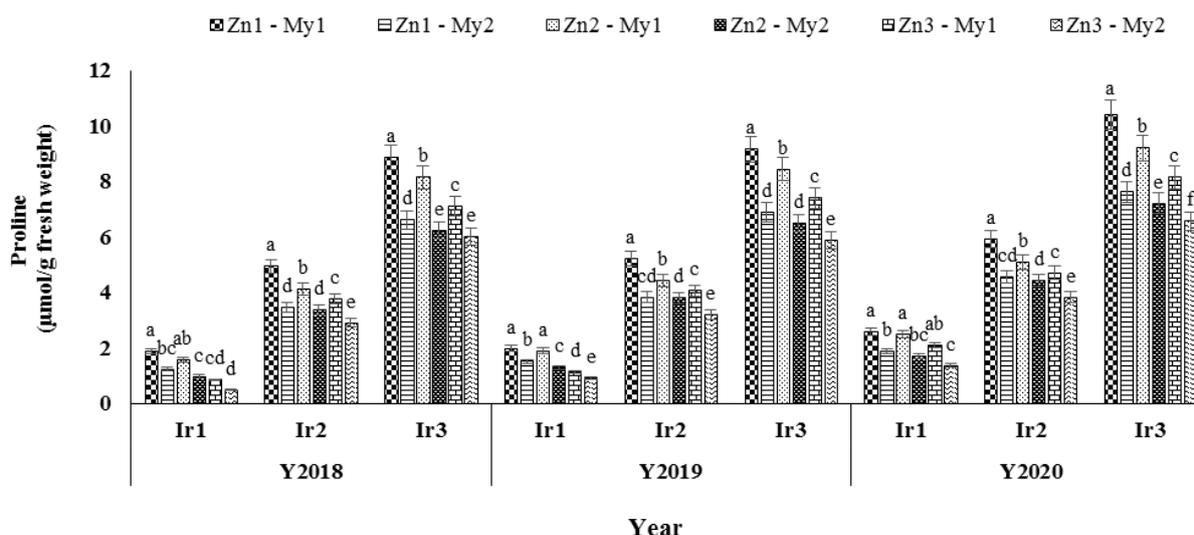
پرولین		کلروفیل کل		درجه آزادی	منابع تغییر		
سال سوم	سال دوم	سال اول	سال سوم	سال دوم	سال اول		
۲.۴۵**	۱/۲۵**	۱/۱۵**	۰/۰۰۴۸۶**	۰/۰۰۳۶**	۰/۰۱۹۰۳**	۲	تکرار
۱۷۲/۲۷**	۱۵۸/۴۷**	۱۶۲/۵۳**	۰/۰۸۵۹۳**	۰/۱۰۰۸۴**	۰/۱۰۴۴۲**	۲	رژیم آبیاری (A)
۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۰۳۶	۰/۰۰۰۹۶	۴	خطای ۱
۴/۸۶**	۴/۶۵**	۴/۳۳**	۰/۰۰۴۴۷**	۰/۰۰۷۱۸**	۰/۰۰۹۶۴**	۲	محلول پاشی سولفات روی (B)
۲۱/۸۹**	۱۶/۴۱**	۱۶/۶۸**	۰/۰۲۰۲۶**	۰/۰۲۷۸۳**	۰/۰۳۱۷۸**	۱	مایکوریزا (C)
۰/۵۱**	۰/۱۹**	۰/۰۶ ns	۰/۰۰۰۶۳**	۰/۰۰۰۰۵ ns	۰/۰۰۰۰۶ ns	۴	(B) × (A)
۲/۴۲**	۲/۵۲**	۱/۷۵**	۰/۰۰۲۷۶**	۰/۰۰۳۲۵**	۰/۰۰۴۴۷**	۲	(C) × (A)
۰/۳۹**	۰/۲۹**	۰/۵۲**	۰/۰۰۰۲۲ ns	۰/۰۰۰۱۳ ns	۰/۰۰۰۳۸*	۲	(C) × (B)
۰/۱۸**	۰/۱۰*	۰/۱۳*	۰/۰۰۰۵۸**	۰/۰۰۰۳۷**	۰/۰۰۰۲۲*	۴	(C) × (B) × (A)
۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۸	۳۰	خطای ۲
۴/۳۴	۴/۲۳	۴/۵۴	۳/۷۱	۳/۷۳	۳/۸۱	-	ضریب تغییرات (درصد)

ns و *، ** به ترتیب معنی دار شدن در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و معنی دار نشدن، است.



شکل ۱- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه رژیم آبیاری (۱۰۰٪ نیاز آبیاری Ir1، ۷۵٪ نیاز آبیاری Ir2 و ۵۰٪ نیاز آبیاری Ir3)، محلول پاشی سولفات روی (غلظت صفر Zn1، غلظت ۳ در هزار Zn2 و غلظت ۶ در هزار Zn3) و قارچ مایکوریزا (تلقیح نشده My1 و تلقیح شده My2) بر کلروفیل کل در گیاه گل راعی. در هر مقایسه میله های دارای حروف یکسان، در سطح پنج درصد تفاوت معنی دار آماری ندارند.

کاهش داده است (شکل ۲).
 پرولین یک شاخص قابل اطمینان برای مطالعه اثر تنش های محیطی در گیاهان است (Claussen, 2005). تجمع پرولین در گیاهی تحت تنش به ویژه برگها افزایش می یابد. نقش آن است (Cicek and Cakirlar, 2002) و در همه اندامک های شرایط تنش به دلیل فعال شدن بیوسنتز و غیرفعال شدن تجزیه



شکل ۲- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه رژیم آبیاری (۱۰۰٪ نیاز آبیاری Ir1، ۷۵٪ نیاز آبیاری Ir2 و ۵۰٪ نیاز آبیاری Ir3)، محلول پاشی سولفات روی (غلظت صفر Zn1، غلظت ۳ در هزار Zn2 و غلظت ۶ در هزار Zn3) و قارچ میکوریزا (تلقیح نشده My1 و تلقیح شده My2) بر پرولین در گیاه گل‌راعی. در هر مقایسه میله‌های دارای حروف یکسان، در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار آماری ندارند.

در مقایسه با گیاهان میکوریزایی را تحت تنش خشکی در گیاهانی از قبیل خارمریم (*Silybum marianum* L.) (مزارعی و همکاران، ۱۳۹۶)، ریحان (*Ocimum gratissimum*) (Hazzoumi et al., 2015)، دو گونه آویشن (*Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L. Abdollahi) (Arpanahi et al., 2020) و گندم (*Triticum aestivum*) (Abdi et al., 2021) گزارش کرده‌اند. مطابق با نتایج این پژوهش در تحقیق پناهیان کیوی (۱۳۹۸) بر گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) محلول پاشی روی با غلظت‌های ۳ و ۶ در هزار در همه سطوح آبیاری منجر به کاهش میزان پرولین برگ شد. احتمالاً کاهش در محتوای پرولین به دلیل نقش میکوریزا در جذب آب بیشتر و کاهش اثرات تنش و همچنین نقش روی در تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و خنثی‌سازی اثر رادیکال‌های آزاد و در نتیجه کاهش اثرات تنش خشکی می‌باشد. Khan و همکاران (۲۰۰۴) نیز گزارش کردند، که محتوای پرولین برگ نخود (*Cicer arietinum* L.) تحت تنش خشکی افزایش یافت، ولی کاربرد روی موجب کاهش آن در هر سطح تنش خشکی شد، زیرا روی با تعدیل اثر تنش خشکی موجب کاهش نیاز گیاه برای صرف انرژی در مکانیزم‌های دفاعی مانند

مشخص پرولین تنظیم فشار اسمزی است و از اکسیداسیون درونی سلول‌ها در شرایط تنش جلوگیری می‌نماید، به همین دلیل پرولین در گیاهانی که تحت تنش‌های سخت قرار می‌گیرند تجمع می‌یابد (Bayer, 2007). همسو با نتایج این پژوهش Simon-Sarkadi و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی بر گیاه دارویی گشنیز دریافتند، که تنش خشکی موجب افزایش پرولین در این گیاه شده است. در سرخارگل (*Echinacea purpurea*) برای مقابله با تنش کم آبیاری با سطوح ۲۵، ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب در دسترس خاک، محتوای پرولین در برگ افزایش پیدا کرد (Jalil Sheshbahrhe et al., 2019) و همچنین افزایش تنش خشکی موجب افزایش غلظت پرولین در گل‌راعی (*Hypericum perforatum*) (Torun et al., 2021)، دو گونه آویشن (*Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L. Abdollahi Arpanahi et al., 2020)، ماش (*Vigna radiata* L.) (Bangar et al., 2019)، گل همیشه‌بهار (*Calendula officinalis*) (صاحب‌حسن و همکاران، ۱۳۹۹)، چای‌ترش (*Hibiscus sabdaeiffa* L.) (صنایعی و همکاران، ۱۳۹۹) شد. همانند این پژوهش، محققین زیادی انباشتگی پرولین در گیاهان دارویی تلقیح‌نشده با AMF

تجمع مواد تنظیم‌کننده اسمزی می‌گردد. نتایج مشابهی نیز مبنی بر تغییر محتوای پرولین سویا در غلظت‌های مختلف روی توسط Karami و همکاران (۲۰۱۶) گزارش شده است. البته از آنجا که ریزمغذی روی در سوخت‌وساز پروتئین و اسیدهای آمینه از جمله پرولین نقش اساسی دارد (Kobraee *et al.*, 2011)، در مطالعه برخی از گیاهان از جمله؛ سویا (Joorabi *et al.*, 2020) و گلرنگ (موحدی دهنوی و همکاران، ۱۳۸۵) بیان شده است، که افزایش تنش کم آبیاری و محلول‌پاشی عنصر روی موجب افزایش پرولین شد.

قندهای محلول کل: برهمکنش سه‌گانه رژیم آبیاری، محلول‌پاشی سولفات روی و قارچ مایکوریزا در هر سه سال در سطح ۵ درصد بر میزان قندهای محلول کل در گیاه گل‌راعی معنی‌دار شد (جدول ۳)، نتایج مقایسه میانگین برهمکنش محلول‌پاشی سولفات روی و قارچ مایکوریزا در هر سطح رژیم آبیاری برای میزان قندهای محلول کل در گیاه گل‌راعی نشان داد، که در تمام سطوح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبیاری) در هر سه سال بیشترین مقدار قندهای محلول کل در تیمار محلول‌پاشی ۶ در هزار سولفات روی+ تلقیح با قارچ مایکوریزا و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد محلول‌پاشی و بدون تلقیح با مایکوریزا به‌دست آمده است. بر اساس نتایج، افزایش تنش آبیاری+ محلول‌پاشی روی+ تلقیح با قارچ مایکوریزا در هر سه سال سبب افزایش قندهای محلول کل در گل‌راعی شده است (شکل ۳).

رایج‌ترین مکانیسم سازش گیاهان با تنش خشکی، تجمع قندهای محلول و اسیدهای آمینه آزاد در درون سلول است (Karimi *et al.*, 2012). در پاسخ به تنش‌های محیطی تجمع قندهای محلول در قسمت‌های مختلف گیاهان افزایش می‌یابد. Finkelstein و Gibson (۲۰۰۱) نیز به نقش مؤثر قندهای محلول در حفاظت سلول‌ها در برابر تنش‌ها اشاره کرده‌اند. تلقیح قارچ مایکوریزا نیز سبب افزایش تجمع اسمولیت‌های سازگار از جمله کربوهیدرات‌ها برای کاهش از دست دادن آب می‌گردد (Gupta *et al.*, 2020; Abdi *et al.*, 2021). زیرا در گیاهان تلقیح‌شده با مایکوریزا فتوسنتز بیشتری انجام می‌شود و

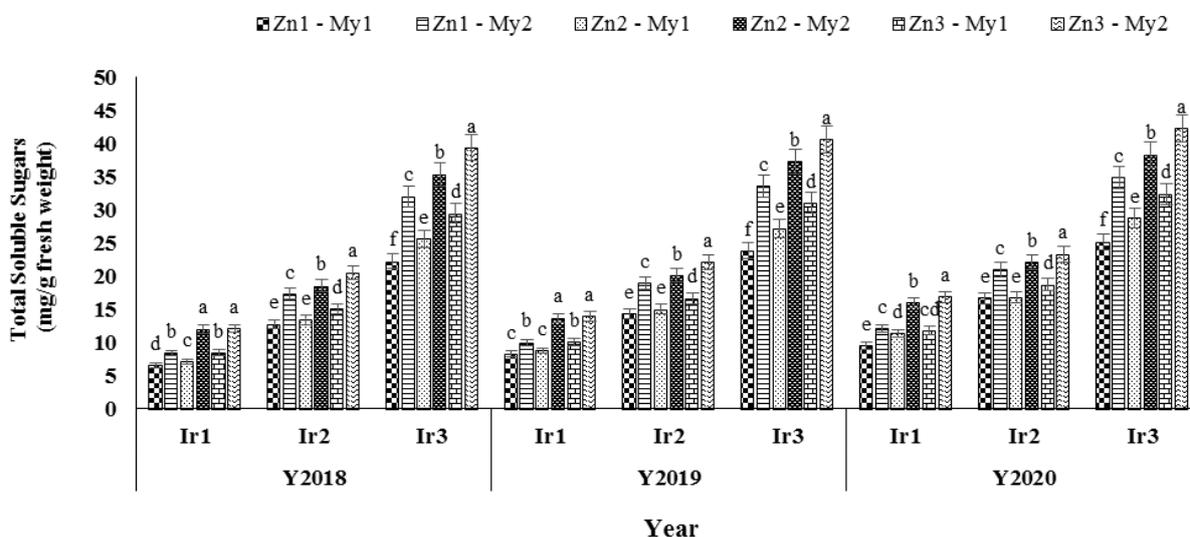
همزیستی با مایکوریزا فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزکننده را بیشتر و تعداد واحدهای فتوسنتزی را افزایش می‌دهد، که این امر سبب تولید بیشتر کربوهیدرات‌ها در گیاه می‌شود. در شرایط تنش نیز با تجزیه کربوهیدرات‌های مرکب، تولید و تجمع قندهای محلول بیشتر می‌گردد (Aobert and Auge, 2001). به‌نظر می‌رسد که مایکوریزا با افزایش فتوسنتز به‌خصوص در شرایط تنش که مصرف قند به‌خاطر کاهش رشد گیاه کم می‌شود منجر به افزایش تجمع قندهای محلول گردیده است. همسو با نتایج این پژوهش Attarzadeh و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی بر گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea*) بیان کردند، که تلقیح AMF قندهای محلول را افزایش داد. ریزمغذی روی نیز در سنتز کربوهیدرات‌ها نقش اساسی دارد (Kobraee *et al.*, 2011). چنان‌که مطابق با نتایج این آزمایش در بررسی موحدی دهنوی و همکاران، (۱۳۸۵) بر گیاه گلرنگ، افزایش تنش کم آبیاری همراه با محلول‌پاشی عنصر روی با غلظت سه در هزار سبب افزایش قند محلول در ارقام گلرنگ شد. در گزارش اصل محمدی و همکاران (۱۴۰۰) نیز محلول‌پاشی روی سبب افزایش محتوای قند محلول در گیاه آویشن شد. قابل ذکر است، که رابطه همزیستی مایکوریزایی با ریشه اغلب گیاهان زراعی، از طریق گسترش مسیلموم‌های قارچ موجب افزایش جذب آب و عناصر معدنی از جمله فسفر و برخی عناصر کم مصرف همچون روی و مس، می‌شود و تأثیر منفی تنش‌های محیطی را کاهش داده و سبب بهبود در رشد و عملکرد گیاهان میزبان در سیستم‌های کشاورزی پایدار می‌شود (جهان و نصیری محلاتی، ۱۳۹۲).

مالون دی‌آلدهید: برهمکنش سه‌گانه رژیم‌های آبیاری، محلول‌پاشی سولفات روی و قارچ مایکوریزا در هر سه سال در سطح ۵ درصد بر میزان مالون دی‌آلدهید در گیاه گل‌راعی معنی‌دار شد (جدول ۴)، نتایج مقایسه میانگین برهمکنش محلول‌پاشی سولفات روی و قارچ مایکوریزا در هر سطح رژیم آبیاری برای محتوای مالون دی‌آلدهید در گیاه گل‌راعی نشان داد، که در تمام سطوح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبیاری) در هر سه سال بیشترین مقدار مالون دی‌آلدهید در

جدول ۳- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس قندهای محلول و مالون دی آلدئید در گیاه گل راعی تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری، محلول پاشی سولفات روی و کاربرد خاکی قارچ میکوریزا

مالون دی آلدئید			قندهای محلول کل			درجه آزادی	منابع تغییر
سال سوم	سال دوم	سال اول	سال سوم	سال دوم	سال اول		
۴۴/۳۲**	۳۴/۹۷**	۲۹/۰۰**	۴/۷۹**	۹/۸۱**	۶/۹۷**	۲	تکرار
۵۳۵/۶۳**	۵۲۹/۲۶**	۵۵۳/۴۴**	۱۹۹۵/۵۳**	۲۱۵۲/۴۵**	۲۱۶۴/۹۴**	۲	رژیم آبیاری (A)
۴/۹۳	۵/۵۲	۳/۴۲	۰/۵۵	۱/۰۷	۱/۱۹	۴	خطای ۱
۷۵/۷۷**	۹۵/۳۶**	۸۰/۳۹**	۸۴/۶۳**	۸۰/۸۱**	۸۲/۴۳**	۲	محلول پاشی سولفات روی (B)
۱۷۶/۱۹**	۱۸۰/۹۹**	۲۳۴/۶۷**	۵۱۶/۱۵**	۵۰۷/۱۷**	۵۰۳/۷۴**	۱	مایکوریزا (C)
۳/۸۵**	۳/۸۲**	۲/۶۱*	۱۲/۱۴**	۹/۹۴**	۱۰/۸۱**	۴	(B) × (A)
۳/۵۰**	۳/۵۶**	۱۲/۶۵**	۴۲/۴۰**	۴۹/۲۲**	۴۹/۳۱**	۲	(C) × (A)
۲/۷۸*	۰/۸۹ ns	۸/۰۸**	۱/۴۰**	۲/۱۹**	۱/۷۴**	۲	(C) × (B)
۲/۷۹*	۱/۲۱*	۲/۵۵*	۰/۷۸**	۱/۱۵**	۱/۰۳**	۴	(C) × (B) × (A)
۰/۹۶	۰/۴۱	۰/۷۸	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۴	۳۰	خطای ۲
۵/۴۸	۴/۳۹	۵/۵۳	۲/۲۳	۲/۶۱	۲/۶۳	-	ضریب تغییرات (درصد)

ns و **، * به ترتیب معنی دار شدن در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و معنی دار نشدن، است.



شکل ۳- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه رژیم آبیاری (۱۰۰٪ نیاز آبیاری Ir1، ۷۵٪ نیاز آبیاری Ir2 و ۵۰٪ نیاز آبیاری Ir3)، محلول پاشی سولفات روی (غلظت صفر Zn1، غلظت ۳ در هزار Zn2 و غلظت ۶ در هزار Zn3) و قارچ میکوریزا (تلقیح نشده My1 و تلقیح شده My2) بر قندهای محلول کل در گیاه گل راعی. در هر مقایسه میله‌های دارای حروف یکسان، در سطح پنج درصد تفاوت معنی دار آماری ندارند.

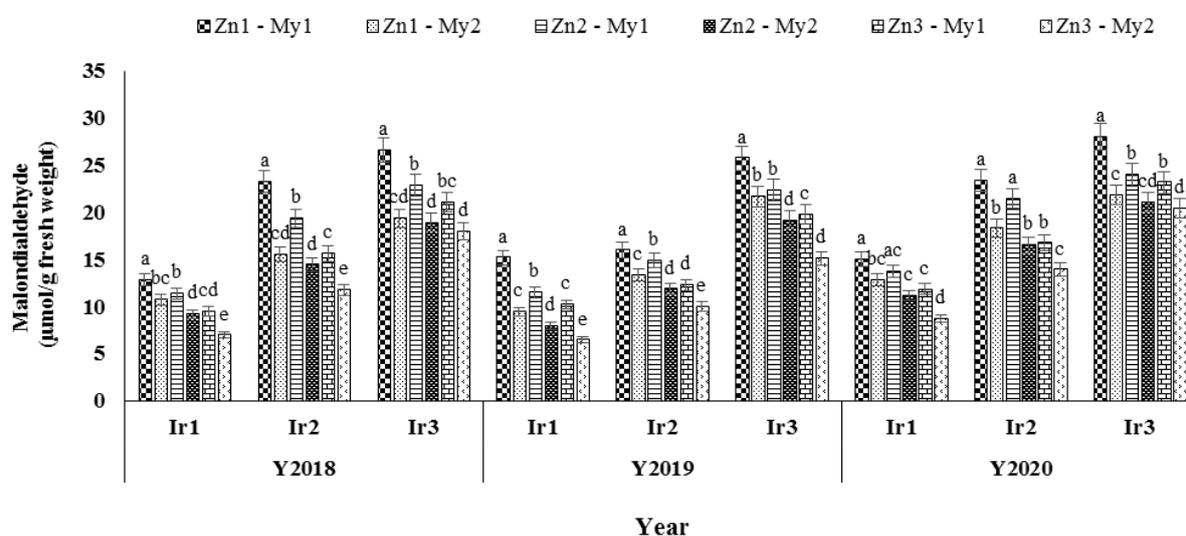
تنش آبیاری در هر سه سال سبب افزایش مالون دی آلدئید در گل راعی شده است ولی محلول پاشی روی + تلقیح با قارچ میکوریزا مقدار آن را کاهش و سبب تعدیل شرایط تنش شده

تیمار شاهد (بدون محلول پاشی و بدون تلقیح با میکوریزا) و کمترین مقدار آن در تیمار شش در هزار سولفات روی + تلقیح با قارچ میکوریزا به دست آمده است. بر اساس نتایج افزایش

جدول ۴- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس محتوای آب نسبی برگ در گیاه گل‌راعی تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری، محلول‌پاشی سولفات روی و کاربرد خاکی قارچ میکوریزا

محتوای آب نسبی برگ (RWC)			درجه آزادی	منابع تغییر
سال سوم	سال دوم	سال اول		
۱۳/۶۴ ^{ns}	۱۴۷۴/۲۴**	۴۳۱/۷۷**	۲	تکرار
۵۸۷/۰۹**	۱۰۵۰/۴۰**	۳۱۱/۷۴**	۲	رژیم آبیاری (A)
۲۲۸/۴۸	۵۰/۸۷	۱۱۲/۸۸	۴	خطای ۱
۹۷/۵۷*	۱۳۷/۸۹*	۵۴/۷۸**	۲	محلول‌پاشی سولفات روی (B)
۲۹۴/۰۰**	۵۴۳/۴۰**	۱۳۱/۲۹**	۱	مایکوریزا (C)
۲/۸۱ ^{ns}	۲۰/۵۵ ^{ns}	۱/۶۲ ^{ns}	۴	(B) × (A)
۲/۲۱ ^{ns}	۲۸/۱۸ ^{ns}	۱/۱۶ ^{ns}	۲	(C) × (A)
۱/۵۱ ^{ns}	۷/۵۵ ^{ns}	۰/۳۸ ^{ns}	۲	(C) × (B)
۳/۹۸ ^{ns}	۲۷/۵۸ ^{ns}	۰/۴۹ ^{ns}	۴	(C) × (B) × (A)
۲۲/۵۸	۳۷/۱۸	۸/۶۲	۳۰	خطای ۲
۶/۲۱	۹/۷۱	۴/۲۹	-	ضریب تغییرات (درصد)

ns و **، * به ترتیب معنی‌دار شدن در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و معنی‌دار نشدن، است.



شکل ۴- مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه رژیم آبیاری (۱۰۰٪ نیاز آبیاری Ir1، ۷۵٪ نیاز آبیاری Ir2 و ۵۰٪ نیاز آبیاری Ir3)، محلول‌پاشی سولفات روی (غلظت صفر Zn1، غلظت ۳ در هزار Zn2 و غلظت ۶ در هزار Zn3) و قارچ میکوریزا (تلقیح‌نشده My1 و تلقیح‌شده My2) بر مالون دی‌آلدئید در گیاه گل‌راعی. در هر مقایسه میله‌های دارای حروف یکسان، در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار آماری ندارند.

است (شکل ۴). استفاده می‌شود (Kong et al., 2016). مالون دی‌آلدئید که از تجزیه اسیدهای چرب اشباع‌نشده چندگانه تشکیل می‌شود با تنش خشکی در گیاه افزایش می‌یابد، اما تحت تنش خشکی در مالون دی‌آلدئید (MDA) محصول نهایی پراکسیداسیون لیپیدی است و به‌طور گسترده به‌عنوان نشانگر اکسیداتیو لیپیدی

گیاهان تلقیح شده با AMF در مقایسه با گیاهان شاهد سطوح پایین تری از MDA ظاهر می شود. این نشان می دهد، که تلقیح گیاه با AMF در مقایسه با تیمار بدون تلقیح، برای محافظت از گیاهان در برابر استرس اکسیداتیو مؤثر است (Siddique et al., 2022). مطابق با نتایج این پژوهش نیز با افزایش تنش خشکی MDA در مطالعه موحدی دهنوی و همکاران، (۱۳۸۵) بر گیاه سرخارگل، غریبی و همکاران (۱۳۹۱) بر گیاه بومادران بیابانی (*Achillea tenuifolia*) (Abdollahi Arpanahi et al., 2020)، بر دو گونه آویشن (*Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L.) (Abdi et al., 2021) بر گیاه گندم (*Triticum aestivum*) و (Sheteiwiy et al., 2021; Salloum et al., 2019) بر گیاه سویا افزایش یافت، اما در تیمارهای تلقیح شده با AMF کاهش یافت. زیرا قارچ میکوریزا از طریق افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان، کاهش پراکسیداسیون لیپیدها، نفوذپذیری غشاء و افزایش تجمع ترکیبات تنظیم کننده اسمزی قادر به کاهش خسارت ناشی از تنش خشکی است. چنان که موحدی دهنوی و همکاران (۱۳۸۵) نیز در آزمایش بر گیاه سرخارگل مشاهده کردند، که با افزایش تنش تا ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، همراه با افزایش پراکسیداسیون لیپیدی (افزایش مالون دی آلدئید) فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان نیز افزایش می یابد.

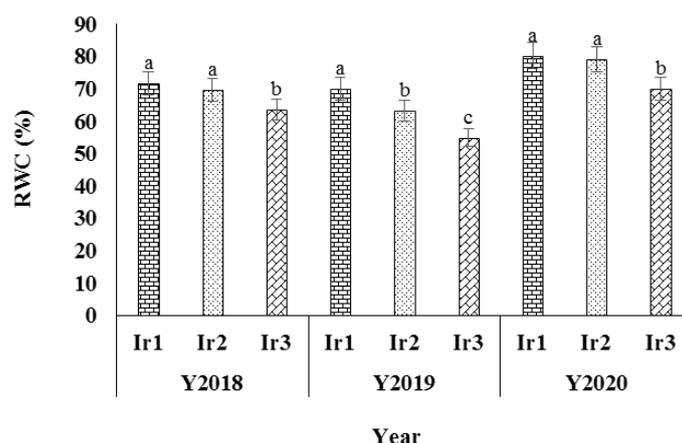
محتوای آب نسبی برگ (RWC): بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر ساده تیمارهای رژیم های آبیاری و تلقیح با قارچ میکوریزا در هر سه سال بر محتوای آب نسبی برگ گیاه گل راعی در سطح ۱ درصد و برای محلول پاشی سولفات روی در سال اول در سطح ۱ درصد و در سال های دوم و سوم در سطح ۵ درصد معنی دار بود (جدول ۴). جدول مقایسه میانگین هر یک از این تیمارها نیز بیانگر آن بود، که بیشترین محتوای آب نسبی برگ در ۱۰۰ درصد نیاز آبی و کمترین مقدار آن در ۵۰ درصد نیاز آبی حاصل شد. در محلول پاشی بیشترین مقدار محتوای آب نسبی برگ در تیمار ۶ در هزار سولفات روی و کمترین مقدار در تیمار شاهد به دست آمد و در تلقیح با قارچ میکوریزا بیشترین مقدار محتوای آب نسبی برگ در تیمار

تلقیح شده با قارچ حاصل گردید (شکل های ۵، ۶ و ۷). محتوای آب نسبی برگ، جذب آب به وسیله بافت ها و سلول ها را نشان می دهد (Silva et al., 2007). محتوای آب نسبی برگ شاخصی برای نشان دادن آسیب های ناشی از تنش خشکی معرفی شده است و کاهش محتوای آب نسبی برگ از بارزترین علائم فیزیولوژیک کمبود رطوبت خاک است (Piotrowska et al., 2009). با کاهش آب در خاک، گیاه مقدار آب پیکره خود را از طریق افزایش مواد اسمزی درون بافت ها به حداقل می رساند، تا آب با نیروی بیشتری وارد گیاه شود؛ همین امر سبب کاهش آب درون بافت گیاه در شرایط خشکی نسبت به شرایط بدون تنش می گردد (موسوی و همکاران، ۱۳۹۸).

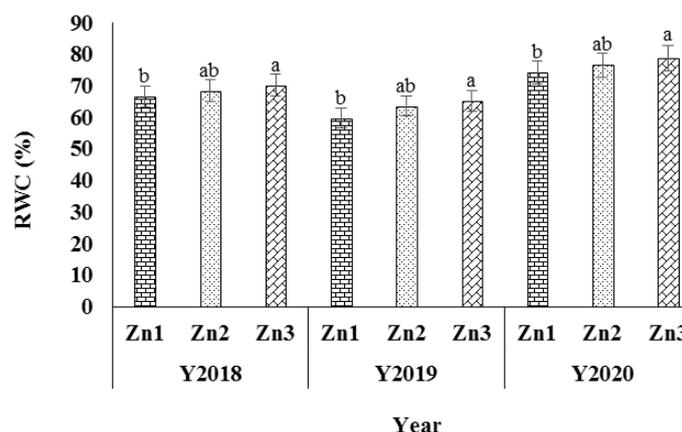
همسو با نتایج این پژوهش Torun و همکاران (۲۰۲۱) در گیاه گل راعی، (Abdollahi Arpanahi et al., 2020) در دو گونه آویشن (*Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L.)، (رضایی نیا و همکاران، ۱۳۹۸) در گیاه نخود (*Cicer Arietinum* L.)، (Parra-Lobato et al., 2009) در گیاهان رزماری و بادرنجبویه (Bangar et al., 2019) در گیاه ماش (*Vigna radiata* L.) و موسوی و همکاران (۱۳۹۸) در گیاه سرخارگل گزارش کردند، که تنش خشکی سبب کاهش محتوای آب نسبی برگ شد، اما تلقیح AMF، محتوای آب نسبی برگ را در دو گونه آویشن (*Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L.) (Abdollahi Arpanahi et al., 2020) افزایش داد.

قابل توجه است که تحت تنش خشکی تجمع یون ها یا مولکول های آلی در واکنش سلول های برگ در گیاهان میکوریزایی بیشتر انجام می شود. به عبارتی قارچ میکوریزا از طریق افزایش طول مؤثر ریشه سبب افزایش جذب عناصر غذایی می گردد و با تأمین آب و عناصر غذایی به ویژه عناصر کم تحرک فسفر، روی و مس، موجب رشد بهتر گیاه می شود و تمام این تغییرات موجب تغییر نسبت آب در گیاهان میکوریزایی می گردد (مزارعی و همکاران، ۱۳۹۶).

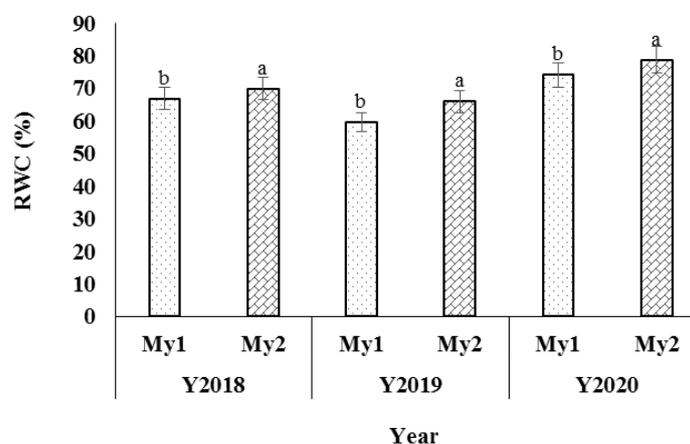
عملکرد اقتصادی گیاه: برهمکنش سه گانه رژیم آبیاری،



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر ساده رژیم آبیاری (۱۰۰٪ نیاز آبیاری Ir1، ۷۵٪ نیاز آبیاری Ir2 و ۵۰٪ نیاز آبیاری Ir3) بر محتوای آب نسبی برگ در گیاه گل‌راعی. در هر مقایسه میله‌های دارای حروف یکسان، در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار آماری ندارند.



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر ساده محلولپاشی سولفات روی (غلظت صفر Zn1، غلظت ۳ در هزار Zn2 و غلظت ۶ در هزار Zn3) بر محتوای آب نسبی برگ در گیاه گل‌راعی. در هر مقایسه میله‌های دارای حروف یکسان، در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار آماری ندارند.



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر ساده قارچ مایکوریزا (تلقیح نشده My1 و تلقیح شده My2) بر محتوای آب نسبی برگ در گیاه گل‌راعی. در هر مقایسه میله‌های دارای حروف یکسان، در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار آماری ندارند.

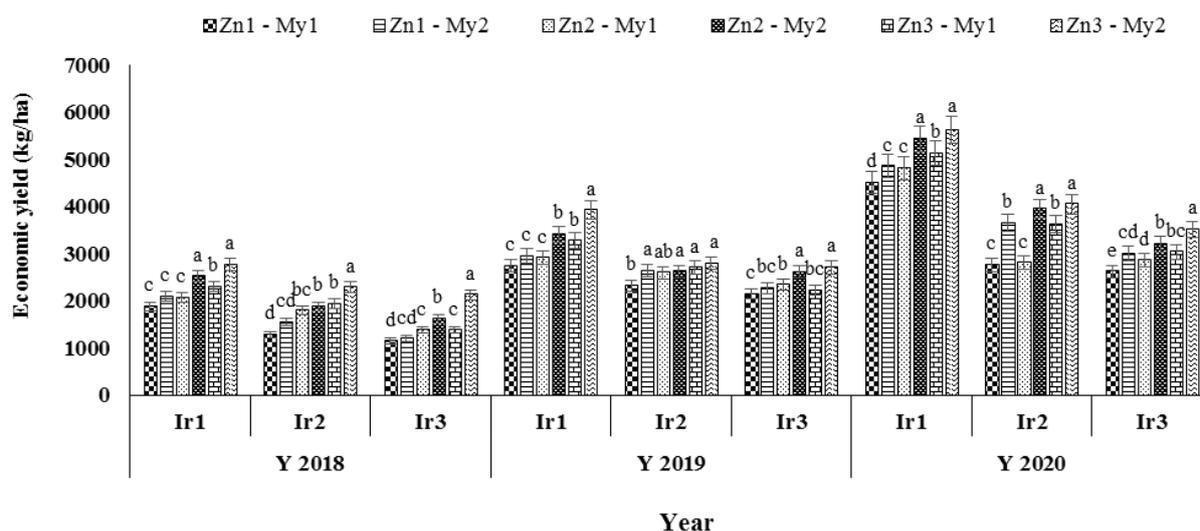
جدول ۵- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس عملکرد اقتصادی در گیاه گل راعی تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری، محلول پاشی سولفات روی و کاربرد حاکی قارچ میکوریزا

عملکرد اقتصادی			درجه آزادی	منابع تغییر
سال سوم	سال دوم	سال اول		
۲۰۸۸۷ ^{ns}	۲۰۹۱۲ ^{ns}	۵۳۶۰ ^{ns}	۲	تکرار
۲۰۳۸۶۴۱۶ ^{**}	۳۱۷۸۷۶۵ ^{**}	۲۹۱۱۰۱۱ ^{**}	۲	رژیم آبیاری (A)
۴۷۱۵۸۳	۴۷۲۲۷۰	۴۳۷۶۰۹	۴	خطای ۱
۱۶۱۰۶۷۶ ^{**}	۸۲۷۹۹۵ ^{**}	۱۶۹۱۲۹۳ ^{**}	۲	محلول پاشی سولفات روی (B)
۴۳۵۶۵۶۰ ^{**}	۱۱۹۸۵۵۶ ^{**}	۱۳۴۳۳۲۰ ^{**}	۱	مایکوریزا (C)
۵۰۸۳۶*	۱۳۹۸۹۱ ^{**}	۹۸۴۰ ^{ns}	۴	(B) × (A)
۲۱۱۴۲۰ ^{**}	۱۰۵۳۵۹ ^{**}	۲۴۹۳۷ ^{ns}	۲	(C) × (A)
۶۸۴۸۹*	۴۲۷۴۱ ^{ns}	۱۴۸۳۳۶ ^{**}	۲	(C) × (B)
۸۳۷۷۶ ^{**}	۵۶۲۸۹*	۵۴۵۸۲*	۴	(C) × (B) × (A)
۱۵۹۱۵	۱۵۸۷۶	۱۶۵۳۳	۳۰	خطای ۲
۳/۲۷	۴/۶۱	۶/۹۸	-	ضریب تغییرات (درصد)

***، * و ns به ترتیب معنی دار شدن در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و معنی دار نشدن، است.

افزایش بنیه آن در سال سوم نسبت داد (شکل ۸). پژوهش‌های انجام‌شده بر روی گیاهان در شرایط تنش خشکی نشان داده است که همزیستی گیاهان با قارچ میکوریزا، سبب افزایش رشد و عملکرد گیاهان و همچنین کمک به افزایش مقاومت محصولات زراعی در برابر شرایط تنش خشکی می‌گردد (Liu et al., 2015). چنان که Richter و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیق بر گیاه گل‌راعی گزارش کردند، که گیاهان تلقیح‌شده با میکوریزا در مقایسه با گیاهان غیرمایکوریزایی افزایش عملکرد داشتند Jalil Sheshbahreh و همکاران (۲۰۱۹) نیز بیان کردند، که در شرایط تنش خشکی جذب مواد مغذی اطراف ریشه گیاه سرخارگل (*E. purpurea*) به دلیل فشار اسمزی کاهش می‌یابد، اما کاربرد میکروارگانیزم‌های مفید خاک جذب مواد مغذی و عملکرد اقتصادی را افزایش می‌دهد. قارچ‌های گلوبوس در بین میکروارگانیزم‌هایی که محیط اطراف ریشه را اشغال می‌کنند، منحصر به فرد بوده و با ایجاد رابطه همزیستی با ریشه اغلب گیاهان زراعی که اصطلاحاً همزیستی میکوریزایی

محلول پاشی سولفات روی و قارچ میکوریزا در سال‌های اول و دوم در سطح احتمال ۵ درصد و در سال سوم در سطح احتمال ۱ درصد بر عملکرد اقتصادی در گیاه گل راعی معنی دار شد (جدول ۵)، نتایج مقایسه میانگین برهمکنش محلول پاشی سولفات روی و قارچ میکوریزا در هر سطح رژیم آبیاری برای عملکرد اقتصادی در گیاه گل راعی حاکی از آن بود، که در تمام سطوح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبیاری) در هر سه سال بیشترین عملکرد اقتصادی گیاه در تیمار محلول پاشی ۶ در هزار سولفات روی همراه با تلقیح قارچ میکوریزا و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد محلول پاشی و بدون تلقیح میکوریزا به دست آمده است. به‌طورکلی افزایش تنش آبیاری در هر سه سال باعث کاهش عملکرد اقتصادی گیاه گل راعی شده است، ولی محلول پاشی روی همراه با قارچ میکوریزا سبب افزایش عملکرد اقتصادی و تعدیل تنش آبی شده است. همچنین بخشی از تغییرات عملکرد اقتصادی در سال‌های مختلف را جدا از تأثیر افزایشی کاربرد روی و میکوریزا می‌توان به چند ساله بودن گیاه گل راعی و



شکل ۸- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه رژیم آبیاری (۱۰۰٪ نیاز آبیاری Ir1، ۷۵٪ نیاز آبیاری Ir2 و ۵۰٪ نیاز آبیاری Ir3)، محلول پاشی سولفات روی (غلظت صفر Zn1، غلظت ۳ در هزار Zn2 و غلظت ۶ در هزار Zn3) و قارچ مایکوریزا (تلقیح نشده My1 و تلقیح شده My2) بر عملکرد اقتصادی در گیاه گل‌راعی. در هر مقایسه میله‌های دارای حروف یکسان، تفاوت معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد ندارند.

کردند، که آبیاری کامل باعث افزایش عملکرد زیستی و تنش خشکی ملایم و شدید باعث کاهش عملکرد کیفی و کمی گل راعی می‌گردد. در تحقیق (احمدیان و همکاران، ۱۳۸۹) بر گیاه بابونه (*Matricaria chamomile*) نیز با افزایش سطح تنش خشکی از ۹۰ به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، عملکرد زیستی بابونه ۱۸/۱ درصد کاهش یافت. رضایور و همکاران (۱۳۹۰) در آزمایشی بر گیاه دارویی سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) گزارش کردند، که تنش خشکی موجب کاهش عملکرد اقتصادی گیاه می‌گردد. مشابه با نتایج حاصل از این پژوهش گیاهان اسطوخودوس، رزماری و آویشن (*Lavandula officinalis*, *Rosmarinus officinalis* and *Thymus vulgaris*) تحت رژیم‌های آبیاری مختلف گزارش کردند، که تنش خشکی باعث کاهش عملکرد اقتصادی گیاهان تلقیح شده و تلقیح نشده گردید، اما تلقیح با قارچ مایکوریزا در کاهش اثرات نامطلوب تنش آبی بسیار مؤثر است. ریاضی و همکاران (۱۳۹۵) نیز نشان دادند، که سولفات روی در تأمین و ایجاد تعادل بین عناصر غذایی بسیار مؤثر است و به‌تنهایی یا در ترکیب با رژیم‌های آبیاری معین می‌تواند در بهبود عملکرد و

گفته می‌شود، موجب افزایش جذب عناصر غذایی مثل فسفر و برخی عناصر کم‌مصرف همچون روی و مس، افزایش جذب آب، کاهش تأثیر منفی تنش‌های محیطی و افزایش مقاومت در برابر عوامل بیماری‌زا شده و سبب بهبود در رشد و عملکرد گیاهان میزبان در سیستم‌های کشاورزی پایدار می‌شوند (جهان نصیری محلاتی، ۱۳۹۲). البته بر اساس نظر محققین هم در محیط‌های پرتنش و هم در محیط‌های بدون تنش AMF مواد مغذی ضروری گیاه میزبان را فراهم می‌کند، در نتیجه رشد و عملکرد گیاه را بهبود می‌بخشد (Begum et al., 2019). همچنین کاربرد عناصر ریز مغذی از جمله روی نیز منجر به گسترش وسیع ریشه و توانایی گیاه برای استفاده از محیط وسیع‌تری در خاک می‌گردد. رابطه مستقیمی بین وجود مقدار کافی روی و تولید آنزیم کربونیک آنیدراز وجود دارد، این آنزیم نقش مهمی در فعالیت فتوسنتز دارد و باعث افزایش تولید کربوهیدرات و در نتیجه عملکرد گیاه می‌شود (نصیری و همکاران، ۱۳۹۲). کمبود روی باعث کاهش رشد و گلدهی گیاه می‌شود و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Fang et al., 2008). همسو با این پژوهش لباسچی و همکاران (۱۳۸۲) در آزمایشی در گیاه گل‌راعی (*Hypericum perforatum* L.) نیز اظهار

آزیم‌های آنتی‌اکسیدان و افزایش مقاومت گیاه و تعدیل شرایط تنش خشکی در گیاه گل راعی می‌گردد. با توجه به اینکه در کشاورزی نوین آب یکی از محدودکننده‌ترین عوامل در تولید محصول به‌شمار می‌آید، نتیجه‌گیری می‌شود، که استفاده از تیمارهای تعدیل‌کننده تنش خشکی از جمله سولفات روی و میکوریزا می‌تواند در تولید پایدار گیاه دارویی گل‌راعی بسیار مفید و مؤثر واقع گردد. پیشنهاد می‌گردد، در مطالعات آینده سطوح تنش آبی بیشتری اعمال گردد. همچنین سایر گونه‌های میکوریزا و یا کودهای زیستی همراه با محلول پاشی عناصر میکرو در جهت بهره‌وری بیشتر آب مورد مطالعه قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب سپاسگزاری خود را از مسئولان ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی چم‌خانی یاسوج و همچنین مسئولان آزمایشگاه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج که در انجام این تحقیق همکاری داشته‌اند، ابراز می‌دارند.

کیفیت گیاه دارویی مریم‌گلی (*Salvia officinalis*) تأثیری مثبت داشته باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل نشان داد، که برهمکنش سه‌گانه رژیم‌های آبیاری + محلول پاشی + میکوریزا در هر سه سال اثری معنی‌دار بر محتوای کلروفیل، پرولین، قندهای محلول، مالون دی‌آلدئید و عملکرد اقتصادی داشت. افزایش تنش آبیاری اثری کاهنده بر محتوای کلروفیل، عملکرد اقتصادی و محتوای آب نسبی برگ داشت، اما بر پرولین، قندهای محلول و مالون دی‌آلدئید اثری افزایشی داشت. از سوی دیگر محلول پاشی سولفات روی و کاربرد خاکی قارچ میکوریزا نیز در هر سطح تنش آبیاری سبب افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل، قندهای محلول و مالون دی‌آلدئید، محتوای آب نسبی برگ و عملکرد اقتصادی در گیاه گل‌راعی گردید، ولی محلول پاشی سولفات روی و کاربرد خاکی قارچ میکوریزا در هر سطح تنش بر پرولین اثری کاهشی داشت. استفاده از محلول پاشی سولفات روی و کاربرد خاکی قارچ میکوریزا با ارتقاء کمی و کیفی صفات بیوشیمیایی احتمالاً سبب کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و افزایش فعالیت

منابع

- احمدیان، احمد، قنبری، احمد، سیاهسر، براتعلی، حیدری مصطفی، رمرودی، محمود، و موسوی نیک، سیدمحمود (۱۳۸۹). اثر بقایای کود شیمیایی، دامی و کمپوست بر عملکرد، اجزای عملکرد، برخی خصوصیات فیزیولوژیک و میزان اسانس بابونه تحت شرایط تنش خشکی. *پژوهش‌های زراعی ایران*، ۸۸ (۴)، ۶۶۸-۶۷۶. <https://www.sid.ir/paper/461146/fa>
- اصل محمدی، زینب، محمدخانی، نیر، و ثروتی، مسلم (۱۴۰۰). اثر محلول پاشی آهن و روی بر برخی صفات بیوشیمیایی گیاه آویشن باغی تحت کمبود نیتروژن (*Thymus vulgaris* L.). *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۳۴ (۳).
- Dor:20.1001.1.23832592.1400.34.3.7
- اکبرزاده مقدم سه قلعه، هادی، و مطلبیان، مهدی (۱۳۸۹). تعیین نیاز آبی گیاه گوجه با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT version8i. مهندسی آب، دانشگاه زابل، ایران.
- امیدی، حشمت، موحدی پویا، فرهاد، و موحدی پویا، شادی (۱۳۹۰). اثر هورمون سالیسیلیک اسید و خراش‌دهی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و محتوای پرولین، پروتئین و کربوهیدرات محلول گیاهچه کهورک (*Prosopis farcta* L.) در شرایط شوری. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۸ (۴)، ۶۰۸-۶۲۳. <https://sid.ir/paper/107153/fa>
- ایلخان، لاله، صدقاتی، ابراهیم، رحیم‌زاده بهزادی، حمید، و حاتمی، نرگس (۱۴۰۲). تأثیر قارچ‌های آربوسکولار میکوریزا بر شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیکی و جذب برخی از عناصر غذایی پیازچه (*Allium fistulosum*). *فرآیند و کارکرد گیاهی*،

DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.56.16.0.۱۳۲-۱۵۲، (۶۵)۲۱

پناهیان کیوی، مهدی (۱۳۹۸). اثر تنش خشکی و محلول‌پاشی سولفات روی بر برخی صفات فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی و عملکرد روغن گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) علوم گیاهان زراعی ایران، ۵۰(۲)، ۱۱۶-۱۰۱.

DOI: 10.22059/ijfcs.2018.259655.654484

جهان، محسن، و نصیری محلاتی، مهدی (۱۳۹۲). حاصلخیزی خاک و کودهای بیولوژیک (رهیافتی اگرواکولوژیک). جلد ۱، دانشگاه

فردوسی مشهد. https://press.um.ac.ir/index.php?option=com_k2&view=item&id=264:f-603&Itemid=714&lang=fa.

حقوق‌شناس، رضا، شرفی، سوران، و قلی‌نژاد، اسماعیل (۱۳۹۹). تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و میکوریزا بر عملکرد ارقام گلرنگ.

Dor: 20.1001.1.24764310.1399.30.2.6.9.۳۹-۹۱، (۲) ۳۰، تولید پایدار، ۳۰(۲)، ۳۹-۹۱.

رضاپور علی‌رضا، حیدری، مصطفی، گلوی، محمد، و رمودی، محمود (۱۳۹۰). تأثیر تنش خشکی و مقادیر مختلف کود گوگرد بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه و (*Nigella sativa* L.) تنظیم‌کننده‌های اسمزی در گیاه دارویی سیاه دانه. فصلنامه علمی-پژوهشی

تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۲۷(۳)، ۳۸۴-۳۹۶. DOI: <http://dx.doi.org/10.22092/ijmapr.2011.6380>.

رضایی‌نیا، مریم، بی‌همتا، محمدرضا، پیغمبری، سیدعلی، و عباسی، علیرضا (۱۳۹۸). تأثیر تنش خشکی بر فعالیت برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و صفات فیزیولوژیکی در ژنوتیپ‌های نخود (*Cicer arietinum* L.). پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی، ۱۱(۳۰)، ۱۱-۱۱.

DOI: 10.29252/jcb.11.30.11.۲۲

ریاضی، پریا، نجات‌زاده، فاطمه، و ولیزادگان، ابراهیم (۱۳۹۵). تأثیر آبیاری و تغذیه روی بر رشد و میزان عملکرد اسانس گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.). مجله تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی و مولکولی، ۶(۲۲)، ۴۰-۳۵.

DOR: 20.1001.1.22285458.1395.6.22.5.0

صاحب‌حسن، مهدی، سلاح‌ورزی، یحیی، نباتی، جعفر، و عزیز، مجید (۱۳۹۹). تأثیر تنش خشکی و برخی کودهای زیستی (باکتری *Pseudomonas fluorescens*، باکتری *Azotobacter chroococcum* و قارچ میکوریز) بر رشد، رنگدانه‌های فتوسنتزی و

برخی صفات فیزیوشیمیایی گل همیشه‌بهار. فرآیند و کارکرد گیاهی، ۹(۳۶)، ۱۳۵-۱۵۲. URL: <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1138-fa.html>.

صنایعی، سارا، برمکی، مرتضی، عبادی خزینه قدیم، علی، و ترابی گیگلو، موسی (۱۳۹۹). اثر تنش خشکی و تلقیح قارچ‌های میکوریزا و باکتری سودوموناس بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک چای‌ترش (*Hibiscus sabdariffa* L.). نشریه دانش کشاورزی و

تولید پایدار، ۹۳(۲)، ۷۱-۸۹. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764310.1399.30.2.5.8>

غریبی، شیما، سیدطباطبایی، بدرالدین، سعیدی، قدرت‌الله، گلی، سیدامیرحسین، و طالبی، مجید (۱۳۹۱). اثر تنش خشکی بر برخی صفات فیزیولوژیک و آنتی‌اکسیدانی بومادران بیابانی (*Achillea tenuifolia*). فصلنامه داروهای گیاهی، ۳، ۱۹۰-۱۸۱.

https://journals.iau.ir/article_633226_2a4dbab2bce13d7837e2cd8c4f4e2a50.pdf

لباسچی، محمدحسین، شریفی عاشورآبادی، ابراهیم، و مظاهری، داریوش (۱۳۸۲). اثرات تنش خشکی بر تغییرات ماده مؤثر گل راعی، هفتمین کنگره علوم زراعت و اصلاح نباتات کرج، ایران. <https://civilica.com/doc/318291>.

مزارعی، ایوب، سیروس مهر، علیرضا، و بابایی، زهرا (۱۳۹۶). تأثیر قارچ میکوریزا بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی خارمریم تحت تنش خشکی. دوماهنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۳۳(۴)، ۶۳۵-۶۲۰.

DOI: 10.22092/ijmapr.2017.107860.1877

موحدی دهنوی، محسن، مدرس ثانوی، سیدعلی محمد، سروش‌زاده، علی، و جلالی، مختار (۱۳۸۵). اثر محلول‌پاشی عناصر کم مصرف روی و منگنز بر عملکرد و اجزا عملکرد سه رقم گلرنگ پاییزه تحت تنش خشکی در منطقه اصفهان. هشتمین کنگره

زراعت و اصلاح نباتات ایران. https://icsc.areeo.ac.ir/article_36102.html

موسوی، شقایق السادات، اسدی صنم، سمانه، و پژمان مهر، مریم (۱۳۹۸). تغییرات ویژگی‌های مورفوفیزیولوژی و عملکرد اسانس برگ و گل سرخارگل (*Echinacea purpurea* (L.) Moench) با کاربرد برگ‌گی سدیم نیتروپروساید (SNP) تحت تنش خشکی.

علوم باغبانی ایران، ۵۰(۲)، ۳۷۵-۳۹۱. DOI: 10.22059/ijhs.2019.279558.1630

نصیری، یوسف، زهتاب، سعید، سلماسی، صفر، نصراله‌زاده، کاظم، قاسمی گل‌عدانی، نجفی، نصرت‌اله، و جوانمرد، عبدالله (۱۳۹۲). ارزیابی اثر محلول پاشی سولفات آهن و روی بر عملکرد گل و غلظت عناصر غذایی در بخش هوایی بابونه آلمانی. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۲۳(۳)، ۱۰۵-۱۱۵. <https://civilica.com/doc/1618869>

Abdi, N., van Biljon, A., Steyn, C., & Labuschagne, M. T. (2021). Bread wheat (*Triticum aestivum*) responses to arbuscular mycorrhizae inoculation under drought stress conditions. *Plants*, 10, 1756. <https://doi.org/10.3390/plants10091756>

Abdollahi Arpanahi, A., Feizian, M., Mehdipourian, G., & Namdar Khojasteh, D. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation improved essential oil and physiological parameters and nutritional values of *Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L. under normal and drought stress conditions. *European Journal of Soil Biology*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103217>

Alavi-Samani, S. M., Ghasemi Pirbalouti, A., Ataei Kachouei, M., & Hamedi, B. (2013). The influence of reduced irrigation on herbage, essential oil yield and quality of *Thymus vulgaris* and *Thymus daenensis*. *Journal of Herbal Drugs*, 4, 109-113.

Allen, R. G., Raes, L. S., & Smith, D. M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. (Irrigation and Drainage Paper 56). https://apgeodb.nancy.inra.fr/biljou/pdf/Allen_FAO1998.pdf

Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>

Attarzadeh, M., Balouchi, H., Rajaie, M., Movahhedi Dehnavi, M., & Salehi, A. (2019). Improvement of *Echinacea purpurea* performance by integration of phosphorus with soil microorganisms under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 221, 238-247. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.022>

Bangar, P., Chaudhury, A., Tivari, B., Kumar, S., Kumar, R., & Bhat, V. K. (2019). Morphophysiological and biochemical response of mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) varieties at different developmental stages under drought stress. *Turkish Journal of Biology*, 43, 58-69. doi:10.3906/biy-1801-64

Barnes, J., Anderson, L. A., & Phillipson, J. D. (2001). St John's wort (*Hypericum perforatum* L.): A review of its chemistry, pharmacology and clinical properties. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 53, 583-600. DOI: 10.1211/0022357011775910

Bayer, C. (2007). Proper proline management needed for effective results. *Journal of Medicinal Chemistry*, 18 (3), 10-25.

Begum, N., Ahanger, M. A., Su, Y., Lei, Y., Mustafa, N. S. A., Ahmad, P., & Zhang, L. (2019). Improved drought tolerance by AMF inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications. *Plants*, 8(12), 579. doi:10.3390/plants8120579

Benitez, J. S. C., Hernandez, T. E., Sundararajan, R., Sarwar, S., Arriaga, A. J., Khan, A. T., Matayoshi, A., Quintanilla, H. A., Kochhar, H., Alam, M., Mago, A., Hans, A., & Benitez, G. A. (2022). Advantages and disadvantages of using St. John's wort as a treatment for depression. *Cureus*, 14(9), e29468. DOI 10.7759/cureus.29468

Bennett, A. E. & Classen, A. T. (2020). Climate change influences mycorrhizal fungal-plant interactions, but conclusions are limited by geographical study bias. *Ecology*, 101(4), e02978. <https://doi.org/10.1002/ecy.2978>

Chandrasekaran, M. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi mediated enhanced biomass, root morphological traits and nutrient uptake under drought stress: a meta-analysis. *Journal of Fungi*, 8, 660. DOI: 10.3390/jof8070660

Cicek, N. & Cakirlar, H. (2002). The effect of salinity on some physiological parameters in two maize cultivars. *Bulgarian Journal of plant Physiology*, 28(2), 66-74. [https://www.scirp.org/\(S\(vtj3fa45qm1ean45%20vffcz55\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2885355](https://www.scirp.org/(S(vtj3fa45qm1ean45%20vffcz55))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2885355)

Claussen, W. (2005). Proline as a measure of stress in tomato plants. *Plant Science*, 168, 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.039>

Coste, A., Pop, C., Halmagyi, A., & Butiuc-Keul, A. (2020). Plant Cell and Tissue Differentiation and Secondary Metabolites, Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-30185-9_9

Deepika, S. & Kothamasi, D. (2015). Soil moisture-a regulator of arbuscular mycorrhizal fungi community assembly and symbiotic phosphorus uptake. *Mycorrhiza*, 25(1), 67-75. DOI: 10.1007/s00572-014-0596-1

Emami Bistgani, Z., Siadat, A., Bakhshandeh, M., Ghasemi Pirbalouti, A., & Hashemi, M. (2017). Interactive effects of

- drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of (*Thymus daenensis* Celak.). *Crop Journal*, 5(5), 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.04.003>
- Fang, Y., Wang, L., Xin, Z., Zhao, L., An, X., & Hu, Q. (2008). Effect of foliar application of zinc, selenium, and iron fertilizers on nutrients concentration and yield of rice grain in China. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 56, 2079-2084. DOI: 10.1021/jf800150z
- FAO. (1992). CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper, Rome. https://ia600205.us.archive.org/31/items/bub_gb_p9tB2ht47NAC_2/bub_gb_p9tB2ht47NAC.pdf
- Finkelstein, R. R. & Gibson, S. I. (2001). ABA and sugar interactions regulating development: Cross-talk or voices in a crowd. *Current Opinion in Plant Biology*, 5, 26-32. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(01\)00225-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(01)00225-4)
- Gupta, A., Rico-Medina, A., & Cano-Delgado, A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368, 266-269. DOI: 10.1126/Sci.aaz7614
- Hazzoumi, Z., Moustakime, Y., Hassan Elharchli, E., & Joutei, K. A. (2015). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and water stress on growth, phenolic compounds, glandular hairs, and yield of essential oil in basil (*Ocimum gratissimum* L.). *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2, 10. <https://doi.org/10.1186/s40538-015-0035-3>
- Heath, R. L. & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125, 189-198. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
- Irigoyen, J. J., Emerich, D. W., & Sanchez, D. M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, 84, 55-60. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>
- Isacchi, B., Bergonzi, M. C., Carnevali, F., Esch, S. A., Vincieri, F. F., & Bilia, A. R. (2007). Analysis and stability of the constituents of St. Johns wort oils prepared with different methods. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 45, 756-761. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2007.08.025>
- Jalil Sheshbahreh, M., Movahhedi Dehnavi, M., Salehi, A., & Bahreininejad, B. (2019). Effect of irrigation regimes and nitrogen sources on biomass production, water and nitrogen use efficiency and nutrients uptake in coneflower (*Echinacea purpurea* L.). *Agricultural Water Management*, 213, 358-367. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.011>
- Joorabi, S., Eisvand, H. R., Ismaili, A., & Nasrolahi, A. (2020). Zn affects soybean grain yield, oil quality, quality and leaf antioxidant activity in drought stress conditions. *Plant Process and Function*, 8(34), 61-70. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1141-fa.html>
- Karami, S., Modarres-Sanavy, A. M., Ghanehpour, S., & Keshavarz, H. (2016). Effect of foliar zinc application on yield and, physiological traits and seed vigor of two soybean cultivars under water deficit. *Notulae Scientia Biologicae*, 8, 181-191. DOI:10.15835/nsb829793
- Karimi, S., Abbaspour, H., Sinaki, J. M., & Makarian, H. (2012). Effects of water deficit and chitosan spraying on osmotic adjustment and soluble protein of cultivars castor bean (*Ricinus communis* L.). *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 8, 160-169. C:/Users/Parsa/Downloads/Effects_of_Water_Deficit_and_Chitosan_Spraying_on_pdf
- Kaya, C. & Higgs, D. (2002). Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) cultivars to foliar application of zinc when grown in sand culture at low zinc. *Scientia Horticulturae*, 93, 53-64. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00310-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00310-7)
- Kaya, C., Higgs, D., & Kernak, H. (2001). The effects of high salinity (NaCl) and supplementary phosphorus and potassium on physiology and nutrition development of development of spinach. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 27, 47-59. <https://www.researchgate.net/publication/228876941>
- Khan, H. R., McDonald, G. K., & Rengel, Z. (2004). Zinc fertilization and water stress affects water relations, stomatal conductance and osmotic adjustment in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plant and Soil*, 8, 267-284. DOI:10.1007/s11104-005-0120-7
- Kobraee, S., Shamsi, K., & Rasekhi, B. (2011). Effect of micronutrients application on yield and yield components of soybean. *Annals of Biological Research*, 2(2), 476-482. <https://www.researchgate.net/publication/260094909>
- Kong, W., Liu, F., Zhang, C., Zhang, J., & Feng, H. (2016). Non-destructive determination of malondialdehyde (MDA) distribution in oilseed rape leaves by laboratory scale NIR hyperspectral imaging. *Scientific Reports*, 6, 35393. <https://doi.org/10.1038/srep35393>
- Liu, T., Sheng, M., Wang, C. Y., Chen, H., Li, Z., & Tang, M. (2015). Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, water status, and photosynthesis of hybrid poplar under drought stress and recovery. *Photosynthetica*, 53(2), 250-258. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11099-015-0100-y>
- Menegazzi, M., Masiello, P., & Novelli, M. (2021). Anti-tumor activity of *Hypericum perforatum* L. and hyperforin through modulation of Inflammatory signaling, ROS generation and proton dynamics. *Antioxidants*, 10(1), 1-25. <https://dx.doi.org/10.3390/antiox10010018>
- Mishra, A. & Choudhuri, M. A. (1999). Effects of salicylic acid on heavy metal-induced membrane deterioration

- mediated by lipoxygenase in rice. *Biologia Plantarum*, 42, 409-415. 10.1023/A:1002469303670
- Murillo-Amador, B., Cordoba-Matson, M. V., Villegas-Espinoza, J. A., Hernandez-Montiel, Troyo-Dieguez, E., & Garcia-Hernandez, J. L. (2014). Mineral content and biochemical variables of *Aloe vera* L. under salt stress. *PLOS One*, 15, 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094870>
- Parra-Lobato, M. C., Fernandez-Garcia, N., Olmos, E., Alvares-Tinaut, M., & GomezJimenez, C. (2009). Methyl jasmonate-induced antioxidant defence in root apoplast from sunflower seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 66, 9-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.01.002>
- Piotrowska, A., Bajguz, A., GodlewskaZylkiewicz, B., & Czerpak, R. (2009). Jasmonic acid modulator of lead toxicity in aquatic plant *Wolffia arrhiza* (Lemnaceae). *Environmental and Experimental*, 66, 507-513. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.03.019>
- Pirzad, A. & Mohammadzadeh, S. (2018). Water use efficiency of three mycorrhizal lamiaceae species (*Lavandula officinalis*, *Rosmarinus officinalis* and *Thymus vulgaris*). *Agricultural Water Management*, 204, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.020>
- Pitman, M. G. & Lauchli, A. (2002). Global impact of salinity and agricultural ecosystems. *Salinity: Environment Plants Molecules*, 3-20. http://dx.doi.org/10.1007/0-306-48155-3_1
- Richter, J., Baltruschat, H., Kabrodt, K., & Schellenberg, I. (2011). Impact of arbuscular mycorrhiza on the St. John's wort (*Hypericum perforatum*) wilt disease induced by *Colletotrichum* cf. *gloeosporioides*. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 118, 109-118. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03356390>
- Robert, M. Auge, (2001). Water relation, drought and VA mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), 3-42. DOI:10.1007/s005720100097
- Salloum, M. S., Insani, M., Monteoliva, M. I., Menduni, M. F., Silvente, S., & Carrari, F. (2019). Metabolic responses to arbuscular mycorrhizal fungi are shifted in roots of contrasting soybean genotypes. *Mycorrhiza*, 29, 459-473. <https://doi.org/10.1007/s00572-019-00909-y>
- Samira, R. K., Rao, K. V., & Saivastava, G. C. (2002). Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress; antioxidant activity and osmolyte concentration. *International Journal of Plant Sciences*, 163, 1037-1046. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00278-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00278-9)
- Sheteiwy, M. S., Fathi Ismail Ali, D., Xiong, Y. C., Brestic, M., Skalicky, M., Alhaj Hamoud, Y., Ulhassan, Z., Shaghaleh, H., AbdElgawad, H., Farooq, M., Sharma, A., & El-Sawah, A. M. (2021). Physiological and biochemical responses of soybean plants inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and Bradyrhizobium under drought stress. *BMC Plant Biology*, 21, 195. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02949-z>
- Siddique, I., Shah, T., Ali, A., Ahmad, I., D'amato, R., & Munsif, F. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi and biofilm forming bacteria act synergistically to modulate proline metabolism, antioxidant defense system and aquaporin genes expression under drought stress. *Preprints*, 1-32. DOI: 10.20944/preprints 202208.0133.v1
- Silva, M. A., Jifon, J. L., Da Silva, J. A. G., & Sharma, V. (2007). Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane, Brazil. *Journal of Plant Physiology*, 19, 193-201. <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202007000300003>
- Simon-Sarkadi, L., Kocsy, G., Varhegyi, A., Galiba, G., & Deronde, J. A. (2006). Effect of drought stress at supraoptimal temperature on polyamine concentrations in transgenic coriander with increased proline levels. *Indian Journal of Medical Research*, 61(11), 833-839. <http://dx.doi.org/10.1515/znc-2006-11-1211>
- Smith, M. & Kivumbi, D. (2004). Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies. joint FAO/IAEA division. FAO Deficit Irrigation Practices. *Water Reports*, 22, 17-27. <https://www.fao.org/3/Y3655E/y3655e05.htm#e>
- Sreenivasulu, N., Harshavardhan, V. T., Govind, G., Seiler, C., & Kohli, A. (2012). Contrapuntal role of ABA: Does it mediate stress tolerance or plant growth retardation under long-term drought stress? *Gene*, 506, 265-27. doi: 10.1016/j.gene.2012.06.076
- Stuart, D. L. & Wills, R. B. (2003). Effect of drying temperature on alkylamide and cichoric acid concentrations of *Echinacea purpurea*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 1608-1610. DOI: 10.1021/jf026213k
- Sun, P., Kang, T., Xing, H., Zhang, Z., Yang, D., Zhang, J., Pare, P. W., & Li, M. (2018). Phytochemical changes in aerial parts of *Hypericum perforatum* at different harvest stages. *Records of Natural Products*, 13(1), 1-9. <http://doi.org/10.25135/rnp.77.18.04.267>
- Torun, H., Eroglu, E., Yalcin, V., & Usta, E. U. (2021). Physicochemical and antioxidant responses of St. john's wort (*Hypericum perforatum* L.) under drought stress. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 9, 40-50. <https://doi.org/10.29130/dubited.847860>
- Yamada, K. & Osakabe, Y. (2018). Sugar compartmentation as an environmental stress adaptation strategy in plants. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 83, 106-114. DOI: 10.1016/j.semcdb.2017.12.015
- Zan, M. J., Chang, H. W., Zhao, P. L., & Wei, J. G. (2007). Physiological and ecological characters studies on *Aloe vera* under soil salinity and seawater irrigation. *Process Biochemistry*, 42, 710-714. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2006.11.002>

- Zarrouk, O., Gogorcena, Y., Gomez-Aparisi, J., Betran, J. A., & Moreno, M. A. (2005). Influence of Almond peach hybrids root stocks on flower and leaf mineral concentration, yield, vigor of two peach cultivars. *Scientia Horticulturae*, 106, 502-514. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.04.011>
- Zhang, T., Hu, Y., Zhang, K., Tian, C., & Guo, J. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi improve plant growth of *Ricinus communis* by altering photosynthetic properties and increasing pigments under drought and salt stress. *Industrial Crops and Products*, 117, 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.087>
- Zirak, N., Shafiee, M., Soltani, G., Mirzaei, M., & Sahebkar, A. (2019). *Hypericum perforatum* in the treatment of psychiatric and neurodegenerative disorders: Current evidence and potential mechanisms of action. *Journal of Cellular Physiology*, 234, 8496-8508. <https://doi.org/10.1002/jcp.27781>

Evaluation of the effect of mycorrhizal fungus and zinc sulfate foliar application on some physiological and biochemical traits and economic yield of *Hypericum perforatum* L. under different irrigation regimes

Goodarz Bagherifard¹, Amin Salehi^{*1}, Mohsen Movahedi Dehnavi¹, Mohammad Sedghi Asl¹ and Alireza Yadavi²

¹ Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran

² Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran

(Received: 2023/12/09, Accepted: 2024/01/22)

Abstract

St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.) is a medicinal plant that is more than 2000 years old. Drought stress is one of the most limiting environmental factors in the growth and production of plants. Plant symbiosis with mycorrhiza fungi and foliar spraying of essential elements can be one of the most effective solutions to deal with drought stress. This research also aims to evaluate the effect of mycorrhizal fungus and zinc sulfate foliar spraying on some biochemical traits and economic yield in St. John's wort under different irrigation regimes in a split factorial experiment with a basic randomized complete block design in three repetitions carried out during the three cropping years of 2018, 2019 and 2020. The main factor is irrigation regimes at three levels (100, 75 and 50% of irrigation needs); sub-factors were ZnSO₄ foliar spraying at three levels (0, 3 and 6 per thousand) and inoculation with an AMF (*Funneliformis mosseae*) at two levels (inoculated and uninoculated). The results showed that the triple interaction of irrigation regimes + foliar spraying + mycorrhiza in all three years had a significant effect on chlorophyll content, proline, soluble sugars, malondialdehyde and economic yield. Increasing irrigation stress had a reducing effect on chlorophyll content, economic yield, and the relative water content of leaves, but on proline, soluble sugars and malondialdehyde had an increasing effect. At each stress level, the highest economic yield was obtained in the treatment of 6 per thousand foliar spraying + inoculation with mycorrhizal fungi. Generally, foliar spraying of zinc sulfate + mycorrhiza increased the content of chlorophyll, sugar solvents and the relative water content of the leaf, caused the adjustment of the stress conditions and increased the resistance of the plant against drought, and by improving the quantitative and qualitative biochemical traits, it increased the economic yield of the St. John's wort plant.

Keywords: Proline, Drought stress, Chlorophyll, *Hypericum perforatum*

Corresponding author, Email: aminsalehi@yu.ac.ir