

اثر ریز جانداران محرک رشد گیاه بر افزایش کارایی مصرف آب یونجه در شرایط محدودیت آبی

مهناز ظفری^۱، علی عبادی^۱، قاسم پرمون^{۱*} و سدابه جهانبخش^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۴/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۵/۲۶)

چکیده

به منظور مطالعه اثر محرک رشد بر کارایی مصرف آب توسط گیاه یونجه، آزمایشی گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، در دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۱ اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل تنش آبی در سه سطح (۵۵، ۷۵، ۳۵ درصد ظرفیت زراعی) و تلقیح بذر در چهار سطح (عدم تلقیح، تلقیح با قارچ میکوریزا *G. mosseae*، تلقیح با باکتری ریزوبیوم *S. meliloti* و تلقیح ترکیبی قارچ و باکتری) بودند. نتایج نشان داد که تنش آبی و تلقیح بذر اثر معنی‌داری در سطح ۱٪ بر مقادیر عناصر برگ داشتند. تنش آبی موجب کاهش جذب فسفر (۲۳٪)، پتاسیم (۸٪) و آهن (۴٪) و افزایش جذب سدیم (۱۴٪) در بذرها و تلقیح نشده گردید. تلقیح بذر موجب کاهش تأثیرات تنش گردید و تلقیح ترکیبی بیشترین تأثیر را نشان داد. هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب نیز تحت تأثیر تلقیح و تنش آبی در سطح ۱٪ قرار گرفتند. هدایت روزنه‌ای طی تنش کاهش یافت و تلقیح بذر با قارچ *G. mosseae* بیشترین تأثیر را در افزایش هدایت روزنه‌ای (۴۷٪ در شدیدترین سطح تنش) نشان داد. کارایی مصرف آب در اثر تنش آبی و نیز تلقیح افزایش یافت، به طوری که بیشترین کارایی مصرف آب (۱۶۶/۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار ۳۵٪ تنش از تلقیح ترکیبی به دست آمد. نتایج معادلات رگرسیونی نشان داد که طی تلقیح، سهم فسفر و پتاسیم در تنظیم هدایت روزنه‌ای افزایش و سهم سدیم کاهش یافت. این در حالی است که در اثر اعمال تنش، سهم پتاسیم و سدیم در تنظیم هدایت روزنه‌ای افزایش و سهم فسفر کاهش پیدا کرد. همچنین، تنش موجب افزایش نقش هدایت روزنه‌ای در افزایش کارایی مصرف آب گردید. این در حالی است که در اثر تلقیح، سهم هدایت روزنه‌ای در افزایش کارایی مصرف آب کاهش پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: تنش رطوبتی، تلقیح ترکیبی، هدایت روزنه‌ای

مقدمه

روی تنفس، کاهش فضای بین سلولی، تخریب پروتئین‌ها، تخریب آنزیم‌ها، تولید مواد سمی، اختلالات هورمونی از جمله افزایش اسید آبسزیک، افزایش تولید انواع اکسیژن واکنش‌گر، کاهش تشدیدکننده‌های رشد و تجمع پرولین و قند می‌شود (۳۴ و ۴۰). تنش، همچنین سبب آسیب به رنگیزه‌ها و پلاستیدها، کاهش کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها و کاهش ضخامت تیلاکوئیدها در اغلب گیاهان می‌گردد. همه این آثار مخرب خشکی باعث کاهش عملکرد محصول خواهند شد (۲۰). جذب عناصر غذایی تحت تأثیر خشکی قرار می‌گیرد. به

افزایش جمعیت جهان در سال‌های گذشته و تأمین مواد غذایی مورد نیاز برای این جمعیت رو به رشد، یکی از مسائل مهم کنونی به شمار می‌آید (۱۷). از مهمترین عواملی که می‌توانند ساختار و عملکرد گیاهان را تحت تأثیر قرار دهند، مقدار آب قابل دسترس برای گیاه و مسئله اقتصاد آب در سطح سلول است. خشکی موجب تغییر در مسیر برخی فرایندهای متابولیک می‌گردد (۳۸). کاهش آب در بافت‌های گیاهی سبب لوله شدن و پیچ خوردن برگ‌ها، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز، اثر

۱. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghasem.parmoon@gmail.com

طوری که در زمان تنش، جریان توده‌ای کاهش و در نتیجه جذب عناصر غذایی دچار اختلال می‌شود (۲۴). کمبود عناصر غذایی در گیاه موجب اختلال در روند جذب و تجمع عناصر غذایی و در نتیجه کاهش عملکرد گیاه می‌شود (۳). طی تنش، به علت ازدیاد غلظت املاح محلول در محیط ریشه و در نتیجه افزایش پتانسیل اسمزی خاک، از جذب عناصر غذایی تا حد زیادی کاسته می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده که در هنگام تنش، میزان سدیم افزایش می‌یابد و برای جلوگیری از سمیت آن، گیاه سعی در خروج و یا به واکوئل فرستادن آن می‌نماید. همچنین، افزایش غلظت پتاسیم طی تنش می‌تواند نقش مهمی در افزایش هدایت روزنه‌ای داشته باشد (۱۳ و ۲۲). در شرایط تنش، روزنه‌ها به‌منظور کاهش تلفات آب، بسته می‌شوند. بسته شدن جزئی یا کامل روزنه‌ها از طریق تجمع ABA در آپوپلاست سلول‌های محافظ روزنه صورت می‌گیرد؛ که این امر در بهبود کارایی مصرف آب نقش زیادی دارد (۱۸).

یکی از مهمترین روش‌های کاهش تأثیر تنش، استفاده از کودهای زیستی می‌باشد. کودهای زیستی مواد نگهدارنده‌ای با جمعیت زیاد موجودات مفید خاک‌زی و یا فرآورده متابولیت این موجودات می‌باشند که در ناحیه اطراف ریشه و یا بخش‌های داخلی گیاه تشکیل کلونی داده و رشد گیاه میزبان را با روش‌های مختلف تحریک می‌کنند (۳۵). اثرهای مفید باکتری‌های محرک رشد بر گیاهان شامل تحریک رشد گیاهان توسط باکتری‌های ریزوسفری از طریق تثبیت نیتروژن اتمسفری، افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی در ناحیه ریزوسفر، افزایش سطح تماس ریشه، تولید تنظیم‌کننده‌های رشد و بهبود همزیستی مفید با گیاه میزبان در مراحل مختلف رشد می‌باشد (۳).

ریزوبیوم‌ها از مفیدترین باکتری‌های خاک‌زی هستند که به دلیل توان تثبیت نیتروژن، توان تولید عوامل محرک رشد گیاه و همچنین به علت وجود فناوری تولید انبوه زادمایه آنها به عنوان یک کود زیستی در سطح جهان شناخته شده‌اند (۲۱). مطالعات نشان می‌دهد که محدوده کاربرد این باکتری‌ها فراتر از گیاهان لگوم بوده و می‌تواند آثار مثبت و اقتصادی برای برنج، ذرت،

گندم و کلزا داشته باشند (۲۷ و ۲۹). خسروی و همکاران (۴) در پژوهشی، تأثیر باکتری‌های ریزوبیومی را بر رشد گندم تحت تنش‌های شوری و خشکی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مایه‌زنی با این باکتری‌ها منجر به افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته، طول ریشه و جذب عناصر غذایی نسبت به شاهد شد. همدیا و همکاران (۲۵) مشاهده کردند که در اثر مایه‌زنی گیاه ذرت با باکتری *Azospirillum brasilense* طی تنش شوری، جذب سدیم کاهش و محتوای پتاسیم و کلسیم اندام هوایی افزایش یافت. همچنین، ذیحی و همکاران (۵) افزایش در جذب عناصر غذایی در اثر تلقیح بذرها با باکتری‌های محرک رشد ریزوسفری را نشان دادند.

تحقیقات نشان داده که باکتری‌های محرک رشد گیاه با تنظیم جذب عناصر غذایی و نگهداری تعادل بین عناصر مفید بر رشد گیاهان طی تنش تأثیرگذارند (۳۰). وفابخش و همکاران (۹) در بررسی نقش تنش بر کارایی مصرف آب ارقام گندم نشان دادند که طی تنش آبی، کارایی مصرف آب افزایش یافت. به طوری که در شرایط ۱۷۵۰ متر مکعب در هکتار آبیاری، بیشترین کارایی مصرف آب (۶/۱۳ گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. استنپیل (۳۷) عامل آب، گونه گیاهی، مسیر فتوسنتز، رفتار روزنه‌ای، اندازه، ساختمان و آرایش برگ‌ها و عوامل اقتصادی تولید را از مؤلفه‌های مؤثر بر کارایی مصرف آب معرفی کرد. کوچکی و همکاران (۷) نیز در مطالعه‌ای، تأثیر همزیستی گونه‌های قارچ میکوریزا بر کارایی مصرف آب کنگد طی تنش خشکی بررسی کرده و دریافتند که در اثر اعمال سطوح آبیاری گوناگون، کارایی مصرف آب به صورت معنی‌داری تغییر پیدا نموده و افزایش مقدار آبیاری از ۲۰۰۰ به ۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار باعث بهبود ۲۲ درصدی کارایی مصرف آب کنگد شد. همچنین، تلقیح با گونه‌های میکوریزا بر عملکرد و کارایی مصرف آب تأثیر به‌سزایی داشت. آنها معتقدند که تلقیح با میکوریزا (*G. mosseae*) با بهبود توسعه سیستم ریشه‌ای و در نتیجه فراهمی رطوبت و دسترسی عناصر غذایی، موجب بهبود کارایی مصرف آب گردیده است (۷).

هدف از این مطالعه، بررسی نقش ریزوموجودات محرک

جدول ۱. نتایج تجزیه خاک مورد استفاده در آزمایش

بافت خاک	درصد ذرات خاک			میزان عناصر قابل جذب (mg/kg)			کربن آلی (%)	pH	شوری (ds/m)
	شن	سیلت	رس	پتاسیم	فسفر	نیتروژن			
لومی	۸۴	۱۴	۲	۱۷۰	۸/۵	۰/۰۶	۰/۶۲	۷/۸۸	۰/۶۲۵

بسته به تیمار، با مایه تلقیح باکتری ریزوبیوم (*Sinorhizobium meliloti*) و قارچ میکوریزا (*Glomus mosseae*) آغشته شدند. برای کشت بذرها در گلدان‌ها ابتدا لایه‌ای از خاک سطح گلدان‌ها را کنار زده و ۲۰ گرم از مایه تلقیح به همراه ۲۰۰ عدد بذرها آغشته شده قرار داده و سپس سطح آنها با خاک پوشانده شد. نتایج تجزیه خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

برای تعیین میزان آب مورد نیاز در هر بار آبیاری، در ابتدا میزان رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی تعیین و سپس گلدان‌ها به صورت روزانه دو نوبت وزن شده و در صورت کمتر بودن وزن گلدان‌ها از حد معین، آب مورد نیاز جهت تأمین حد رطوبتی مورد نظر به هر گلدان اضافه شد (۳۳).

اندازه‌گیری میزان پتاسیم و سدیم و کلسیم به روش بورگان (۱۴) در مرحله برداشت (چین اول، ۱۰٪ گل‌دهی) انجام شد. یک گرم از اندام هوایی خشک در داخل بوتله چینی ریخته و در کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد تا به طور کامل خاکستر شود. بعد از این مدت، روی هر نمونه ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک یک نرمال افزوده و تا نقطه جوش حرارت داده شد. سپس، نمونه داخل بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری صاف و با آب مقطر به حجم رسانده شد. اندازه‌گیری غلظت عناصر با استفاده از دستگاه طیف‌سنج شعله‌ای انجام گرفت. میزان فسفر به روش جونز (۲۸) در طول موج ۵۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری آهن، ۲ گرم از نمونه اندام هوایی در ۸/۰ میلی‌لیتر H_2SO_4 ۳ مولار حل و به حجم ۲۰ میلی‌لیتر رسانده شد، و به ازای هر ۲/۵ میلی‌لیتر از محلول فوق، ۵/۰ میلی‌لیتر از $NH_2OH.HCl$ ۱۰٪، ۵ میلی‌لیتر فنانترویلین ۲۵٪ درصد و ۲ میلی‌لیتر سدیم استات ۱۰٪ افزوده شد و در نهایت به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس، میزان جذب

رشد بر کارایی مصرف آب یونجه از طریق تنظیمات هدایت روزانه‌ای و جذب عناصر غذایی در شرایط تنش آبی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۱ به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی با مختصات جغرافیایی ۳۸°۲۵' عرض شمالی و ۴۸°۳۰' طول شرقی و ارتفاع متوسط ۱۵۰۰ متر از سطح دریا اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد در چهار سطح (عدم تلقیح (کنترل)، تلقیح با باکتری *S. meliloti*، تلقیح با قارچ *G. mosseae* و تلقیح ترکیبی با قارچ و باکتری) و تنش کم‌آبی در سه سطح (۷۵، ۵۵ و ۳۵ درصد ظرفیت زراعی (FC)) بود. در این آزمایش، میزان عناصر فسفر، سدیم، پتاسیم و آهن و همچنین هدایت روزانه‌ای و کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین نقش عناصر در کنترل باز و بسته شدن روزنه‌ها و اثر هدایت روزانه‌ای بر کارایی مصرف آب، بین عناصر و هدایت روزانه‌ای و همچنین بین هدایت روزانه‌ای و کارایی مصرف آب در سطوح مختلف تیمارها تجزیه رگرسیونی انجام گرفت.

در این آزمایش، بذرها سالم و یکنواخت یونجه همدانی جدا شده و سپس توسط آب مقطر استریل شستشو و به مدت ۳۰ ثانیه در اتانل ۹۶٪ و ۲ الی ۳ دقیقه در محلول کلرید جیوه جهت ضدعفونی قرار داده شدند. برای کاهش جمعیت قارچ‌های میکوریزا و سایر میکروارگانیسم‌های بومی موجود در خاک، اقدام به استریل کردن خاک گردید. سپس، گلدان‌های پلاستیکی با ظرفیت ۵ کیلوگرم توسط خاک استریل شده پر شدند. در ادامه،

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر محرک رشد و تنش آبی بر برخی صفات یونجه

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				رتبه	منابع تغییرات
		هدایت	کارایی مصرف آب	عناصر	میانگین مربعات		
		روزنه‌ای	آب	فسفر	آهن	سولیم	پتاسیم
تکرار	۲	۰/۶۴	۰/۰۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۰۵۷	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳
تلقیح (T)	۳	۷۵۹/۸۹**	۰/۰۰۰۱۵**	۱۲/۲۲**	۰/۲۹**	۰/۵۹**	۰/۷**
تنش آبی (D)	۲	۱۵۷۷/۱۰۳**	۰/۰۰۰۴۶**	۴/۰۵**	۰/۴۲**	۰/۶۱**	۰/۷۶**
T×D	۶	۴۹۷/۷۱**	۰/۰۰۰۸۹**	۴/۱۳**	۰/۰۰۰۲**	۰/۲۷**	۰/۳۳**
خطای آزمایش	۲۲	۰/۲۳	۰/۰۰۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰۳۴	۰/۱۵	۰/۰۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۰۷
ضریب تغییرات (%)	-	۱/۲۰	۲/۱۳	۰/۴۱	۰/۱۱	۰/۸۳	۳/۷۱

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

در طول موج ۵۰۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید (۲۶).

هدایت روزنه‌ای نیز قبل از برداشت، در مرحله‌ای که گیاه وارد گل‌دهی شد، با استفاده از دستگاه پرومتر (مدل Leaf Porometer SC-1) از قسمت میانی جوان‌ترین برگ کاملاً توسعه یافته اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری کارایی مصرف آب، میزان آب مورد استفاده برای هر گل‌دان تعیین و در نهایت بعد از برداشت یونجه و به‌دست آوردن وزن خشک گیاه در هر گل‌دان، کارایی مصرف آب از نسبت ماده خشک تولید شده به حجم آب مصرفی به دست آمد (۱۶).

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪ انجام شد. نمودارها با Excel ترسیم و برای تعیین نوع معادلات خطی نیز از نرم‌افزار Minitab استفاده شد.

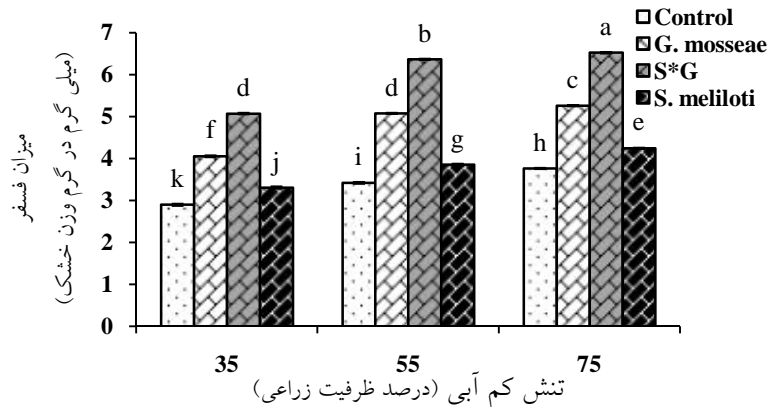
نتایج و بحث

عناصر غذایی

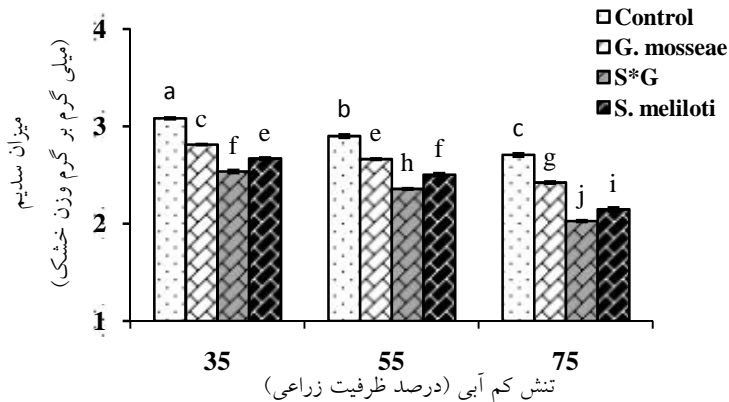
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی تنش آبی و تلقیح بذر و برهمکنش آنها بر میزان فسفر برگ‌های یونجه معنی‌دار بود (۱٪، =). (جدول ۲). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نشان داد که تنش موجب کاهش میزان فسفر شده و تلقیح بذر

در جذب فسفر نقش مهمی ایفا می‌کند. همچنین بین سطوح ۵۵٪ و ۷۵٪ تنش آبی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. ولی در تنش ۳۵٪ کاهش شدیدی در میزان فسفر گیاه رخ داد. تلقیح بذر با میکوریزا (*G. mosseae*) بیشتر از ریزوبیوم (*S. meliloti*) تأثیر داشت. ولی با این وجود، بیشترین میزان فسفر از تلقیح ترکیبی (S×G) به دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار فسفر (به ترتیب ۶/۵۲ و ۲/۹ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) در تلقیح ترکیبی در ۷۵٪ ظرفیت زراعی و عدم تلقیح در ۳۵٪ ظرفیت زراعی به دست آمد (شکل ۱).

اثرهای اصلی تنش آبی و تلقیح بذر و اثر متقابل تنش آبی در تلقیح بذر بر میزان سولیم برگ‌ها معنی‌دار شد (۱٪، =). (جدول ۲). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نشان داد که تنش آبی موجب افزایش و تیمارهای تلقیح موجب کاهش سولیم گردید. افزایش شدت تنش موجب کاهش تفاوت بین تیمارهای تلقیح شد و در بین تیمارهای تلقیح، برخلاف فسفر، تلقیح با ریزوبیوم بیشتر از میکوریزا موجب کاهش تجمع سولیم در اندام هوایی گردید. با این وجود، کمترین میزان سولیم (۳/۰۸ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) از تلقیح ترکیبی در ۷۵٪ ظرفیت زراعی و بیشترین میزان آن (۲/۰۲۹ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) نیز از تیمار عدم تلقیح و ۳۵٪ ظرفیت زراعی به دست آمد (شکل ۲). اثرهای اصلی و متقابل تنش آبی و تلقیح بذر بر میزان



شکل ۱. تأثیر محرک رشد بر میزان فسفر برگ‌های یونجه در اثر تنش آبی. حروف متفاوت تیمارها نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در آزمون LSD سطح ۱٪ می‌باشند.



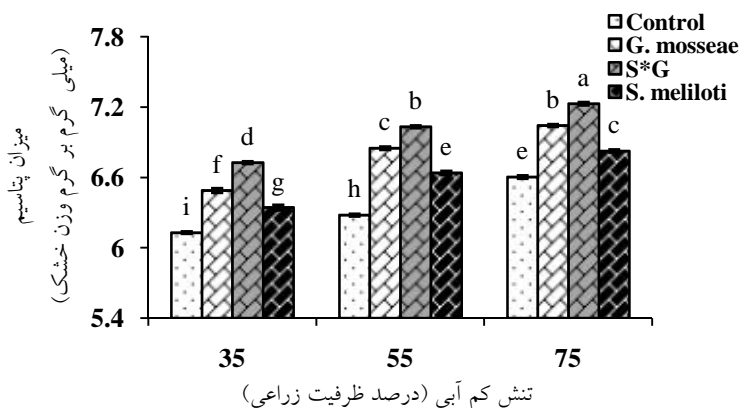
شکل ۲. تأثیر محرک رشد بر میزان سدیم برگ‌های یونجه در اثر تنش کم آبی. حروف متفاوت تیمارها نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در آزمون LSD سطح ۱٪ می‌باشند.

و فسفر، موجب کاهش جذب آهن شده و تلقیح بذر با کاهش تأثیر تنش، جذب آهن را افزایش داد. تلقیح بذر با میکوریزا همانند میزان فسفر و پتاسیم بر جذب آهن بیشتر از ریزوبیوم تأثیرگذار بود و بیشترین میزان آهن از تیمار تلقیح ترکیبی به‌دست آمد، به طوری که بیشترین میزان آهن از تلقیح ترکیبی در ۷۵٪ ظرفیت زراعی (۱۵/۳۰ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) و کمترین مقدار آن نیز از عدم تلقیح در ۳۵٪ ظرفیت زراعی (۱۴/۴۷ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) مشاهده شد (شکل ۴).

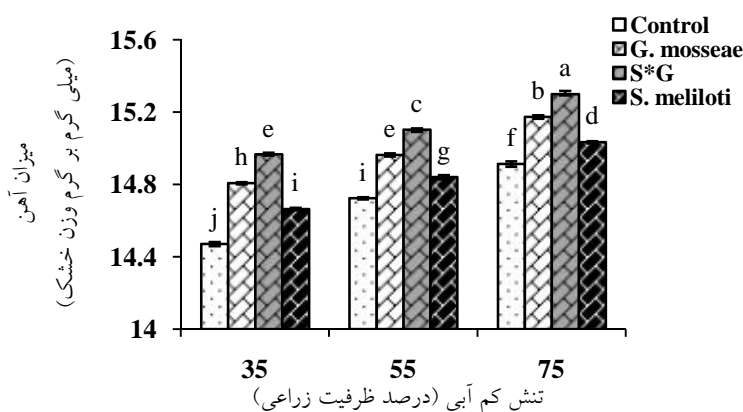
کاهش غلظت پتاسیم در شرایط تنش کم آبی در پژوهش تاج‌آبادی‌پور (۲) و کاهش غلظت آهن در پژوهش ساجدی و رجالی (۶) نیز گزارش شده است. آرزمجو و همکاران (۱) بیان

پتاسیم برگ‌ها معنی‌دار بود (۱٪ =). نتایج نشان داد که میزان پتاسیم در طول تنش آبی کاهش یافت و تلقیح بذر باعث افزایش جذب پتاسیم شد. تلقیح بذر با میکوریزا (*G. mosseae*)، همانند جذب فسفر، بیشتر از تلقیح با ریزوبیوم (*S. meliloti*) بود. ولی با این وجود، بیشترین جذب نیز از تیمار تلقیح ترکیبی مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان پتاسیم به ترتیب از تیمار تلقیح ترکیبی در ۷۵٪ ظرفیت زراعی (۷/۲۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) و عدم تلقیح بذر در ۳۵٪ ظرفیت زراعی (۶/۱۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) به‌دست آمد (شکل ۳).

میزان آهن تحت تأثیر عامل اصلی و اثر متقابل تنش آبی و تلقیح بذر قرار گرفت (۱٪ =، جدول ۲). تنش، همانند پتاسیم



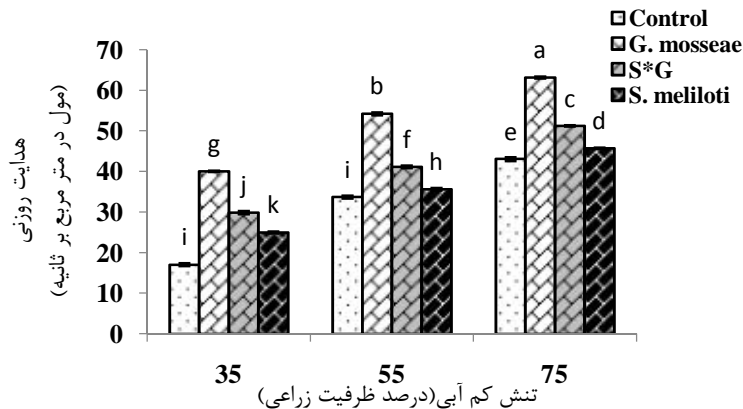
شکل ۳. تأثیر محرک رشد بر میزان پتاسیم برگ‌های یونجه در اثر تنش کم‌آبی. حروف متفاوت تیمارها نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در آزمون LSD سطح ۱٪ می‌باشند.



شکل ۴. تأثیر محرک رشد بر میزان آهن برگ‌های یونجه در اثر تنش کم‌آبی. حروف متفاوت تیمارها نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در آزمون LSD سطح ۱٪ می‌باشند.

میکوریزا با ریشه گیاهان تشکیل سیستم میکوریزای می‌دهند که این امر موجب بهبود جذب آب و عناصر غذایی مانند فسفر، آهن و پتاسیم و کاهش سدیم در شرایط تنش می‌گردد (۱۵، ۲۳ و ۳۶). همچنین، باکتری‌ها موجب گسترش ریشه و افزایش تعداد تار کشنده و حجم ریشه‌ها شده، و فراهمی عناصر در اطراف ریشه و جذب بهتر آنها امکان‌پذیر می‌شود (۱۲). آلیسون و همکاران (۱۱) معتقدند که انتقال سریع‌تر عناصر از طریق هیف‌ها به ریشه موجب افزایش مقدار آنها در گیاه می‌شود. قارچ‌های میکوریزا توانایی استفاده از منابع فسفاتی نامحلول و یا کم‌محلول را نیز دارند که این امر خود به جذب بیشتر فسفر کمک می‌کند (۱۱).

کردند که با افزایش شدت تنش آبی از ۹۰ به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، از میزان پتاسیم کاسته (کاهش از ۳/۷۹ به ۲/۵۰ میلی‌گرم بر گرم) و در مقابل بر مقدار سدیم (از ۱/۱۷ به ۲/۵۸ میلی‌گرم بر گرم) افزوده شد. وفابخش و همکاران (۹) معتقدند که کاهش رشد ریشه در اثر محدودیت رطوبت موجب کاهش سطح تماس ریشه با عناصر و کاهش جذب آنها می‌گردد. چوگان (۳) نیز علت کاهش جذب عناصر در اثر تنش را افزایش پتانسیل اسمزی خاک به علت افزایش املاح محلول در اطراف ریشه و کاهش جذب عناصر توسط ریشه می‌داند. تلقیح بذر موجب افزایش در جذب عناصر شد. قارچ‌های



شکل ۵. تأثیر محرک رشد بر هدایت روزنه‌ای یونجه در اثر تنش کم آبی. حروف متفاوت تیمارها نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در آزمون LSD سطح ۱٪ می‌باشند.

هدایت روزنه‌ای

با توجه به معادلات رگرسیونی (جدول ۳) مشاهده می‌شود که طی تنش ۵۵٪ سهم عناصر در پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای کاهش پیدا کرد، به طوری که R^2 پتاسیم، سدیم و آهن به ترتیب از ۵۵۳٪، ۵۴۲٪ و ۳۷۲٪ به ۴۱۸٪، ۳۷۰٪ و ۲۹۴٪ کاهش پیدا کرد. این در حالی است که در رطوبت ۳۵٪ ظرفیت زراعی سهم عناصر در کنترل هدایت روزنه‌ای افزایش یافت. رطوبت ۳۵٪ موجب افزایش سهم پتاسیم (از ۵۵۳٪ به ۷۵۷٪)، سدیم (از ۵۴۲٪ به ۵۹۸٪) و آهن (از ۳۷۲٪ به ۷۴۵٪) در گیاه شده، ولی بر نقش فسفر تأثیر معنی‌داری نداشت. همچنین، مشاهده شد تغییرات تمام عناصر با هدایت روزنه‌ای به صورت معادله درجه سه بود. با توجه به این که تنش ملایم بر میزان عناصر و هدایت روزنه‌ای تأثیر زیادی نداشته است، کاهش سهم عناصر در پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای می‌تواند به این علت باشد. تحقیقات نشان داده که عناصر غذایی نقش کلیدی در باز شدن روزنه بازی می‌کنند. تروفوتون (۳۹) چنین بیان کرده که مقدار کم پتاسیم، هدایت روزنه‌ای برای CO_2 را بیشتر از هدایت مزوفیلی کاهش می‌دهد. با توجه به معادلات رگرسیونی، مشاهده شد که طی تنش ملایم، سهم پتاسیم در پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای کاهش و طی تنش شدید افزایش یافت. بنابراین، تنش با ایجاد محدودیت در جذب عناصر، بر هدایت روزنه‌ای تأثیر گذاشته و موجب کاهش

هدایت روزنه‌ای در اثرهای اصلی و متقابل تنش کم آبی و تلقیح بذر تغییرات معنی‌داری نشان داد (جدول ۲). تنش موجب کاهش هدایت روزنه‌ای شده و تلقیح بذر در کاهش این تغییرات نقش مؤثری داشت. تلقیح بذر با میکوریزا (*G. mosseae*) بیشترین تأثیر را بر هدایت روزنه‌ای نشان داد و بر خلاف میزان عناصر، این تیمار بهتر از تیمار ترکیبی عمل نمود و در تمام سطوح تنش بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای را نشان داد. اثر این تیمار در حفظ پتانسیل آبی سلول‌های برگ است. بیشترین هدایت روزنه‌ای (۶۱/۱۸ مول در متر مربع بر ثانیه) در شرایط عدم تنش (۷۵٪ ظرفیت زراعی) از تیمار تلقیح با میکوریزا مشاهده شد. این در حالی بود که کمترین هدایت روزنه‌ای (۱۷/۰۲ مول بر متر مربع بر ثانیه) در تنش ۳۵٪ ظرفیت زراعی از بذرهای تلقیح نشده به‌دست آمد (شکل ۵).

هدایت روزنه‌ای طی تنش آبی کاهش پیدا می‌کند. کاهش هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش در پژوهش صنایعی (۱۰) نیز گزارش شده است. بر اساس این پژوهش تنش ۳۵٪ موجب کاهش ۲۰۰ درصدی در هدایت روزنه‌ای یونجه شد. با توجه به نتایج، مشاهده شد که تنش متوسط (۵۵٪) تأثیر زیادی بر میزان هدایت روزنه‌ای نداشت. ولی در تنش شدید، هدایت روزنه‌ای به شدت کاهش پیدا نمود.

جدول ۳. مدل‌های پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای در عناصر مختلف تحت تأثیر تنش کم‌آبی

تنش آبی	عنصر	همبستگی (R ²)	ضرایب معادله رگرسیون				مدل
			b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	
FC / ۳۵	پتاسیم	۰/۷۵۷	۱۶۴۲۵	-۷۷۵۳۶	۱۲۱۸۹	-۶۳۸	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
	سدیم	۰/۵۹۸	۲۷۲۶۲	-۲۹۷۹۴	۱۰۸۳۴	-۱۳۰۹	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
	فسفر	۰/۸۶۴	۲۷۹/۳	-۲۶۴/۴	۸۳/۴۵	-۸/۰۸۶	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
	آهن	۰/۷۴۵	۴۰۵۳۸۴	-۸۲۸۴۵	۵۶۴۲۷	-۱۲۸۱	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
FC / ۵۵	پتاسیم	۰/۴۱۸	۱۷۹۴۹۰	-۸۱۱۱	۱۲۲۰۶	-۶۱۱/۵	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
	سدیم	۰/۳۷۰	۲۱۶۵۶	-۲۵۲۰۳	۹۷۶۲	-۱۲۵۶	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
	فسفر	۰/۸۸۵	۴۸۳/۷	-۳۲۶/۸	۷۶/۴۵	-۵/۶۶۰	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
	آهن	۰/۲۹۴	۱۱۳۲۵۰۳	-۲۲۸۲۳۸	۱۵۳۳۱	-۳۴۳۳	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
FC / ۷۵	پتاسیم	۰/۵۵۳	۲۲۶۰۳۲	-۹۸۶۴۳	۱۴۳۴۰	-۶۹۴/۳	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
	سدیم	۰/۵۴۲	۷۲۷۰	-۹۴۹۲	۴۱۳۳	-۵۹۵/۹	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
	فسفر	۰/۸۶۳	۷۳۵/۱	-۴۶۴/۱	۱۰۰/۹	-۷/۰۲۴	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$
	آهن	۰/۳۷۲	۶۹۳۷۶۹	-۱۳۸۰۷۹	۹۱۵۹۸	-۲۰۲۵	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$

هدایت روزنه‌ای می‌شود.

هدایت روزنه‌ای کاهش پیدا کرد. در شرایط طبیعی، تغییرات پتاسیم و سدیم با هدایت روزنه‌ای از نوع درجه دو ولی تغییرات فسفر و آهن به صورت خطی و درجه سه بود. تلقیح با میکوریزا سبب تغییر معادله پتاسیم به خطی و فسفر و آهن به درجه سه شد. این در حالی است که ریزوبیوم تنها سبب تغییر معادله فسفر از خطی به درجه دو و آهن از درجه سه به خطی گردید. همچنین مشاهده شد که تلقیح ترکیبی موجب تغییر معادله پتاسیم از درجه دو به خطی، فسفر از خطی به درجه دو و آهن از درجه سه به دو شد (جدول ۴). با توجه به این که بیشترین مقدار عناصر از تلقیح ترکیبی و بیشترین هدایت روزنه‌ای از تلقیح با میکوریزا به دست آمد و همچنین طی تلقیح سهم عناصر در پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای کاهش یافت، بنابراین عوامل دیگری مانند تولید هورمون ABA و متابولیت‌های سازگاری علاوه بر عناصر می‌توانند طی تلقیح با میکوریزا باعث افزایش هدایت روزنه‌ای شده باشند.

کارایی مصرف آب

کارایی مصرف آب تحت تأثیر عوامل اصلی تنش آبی و تلقیح

وزان و همکاران (۸) نشان دادند که طی تنش خشکی، میزان تجمع ABA افزایش یافته که این امر موجب کاهش هدایت روزنه‌ای به علت بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق می‌باشد. عناصر می‌توانند علاوه بر تنظیم اسمزی سلول‌های همراه به عنوان سیگنال در تولید هورمون ABA عمل کرده و از این طریق نیز بر هدایت روزنه‌ای تأثیرگذار باشند. تیمارهای تلقیح نیز موجب افزایش هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش شد. تلقیح بذرها با میکوریزا بیش‌ترین هدایت روزنه‌ای را در مقایسه با دیگر تیمارها نشان داد. معادلات رگرسیونی مربوط به تیمارهای تلقیح نشان داد که طی تلقیح با میکوریزا سهم پتاسیم، فسفر و سدیم در پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای افزایش و سهم آهن کاهش نشان داد. به طوری که R² آنها به ترتیب از ۰/۸۶۱، ۰/۹۹۳، ۰/۹۹۳ و ۰/۹۷۸ به ۰/۹۸۶، ۰/۹۹۸، ۰/۹۹۶ و ۰/۹۵۰ رسید. این در حالی است که طی تلقیح با ریزوبیوم نقش پتاسیم (از ۰/۸۶۱ به ۰/۹۸۴)، فسفر (از ۰/۹۹۳ به ۰/۹۹۸) و آهن (از ۰/۹۷۸ به ۰/۹۹۰) افزایش و نقش سدیم (از ۰/۹۹۳ به ۰/۹۸۵) کاهش یافت.

مشاهده شد که طی تلقیح ترکیبی، نقش عناصر در پیش‌بینی

جدول ۴. مدل‌های پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای در عناصر مختلف تحت تأثیر محرک رشد

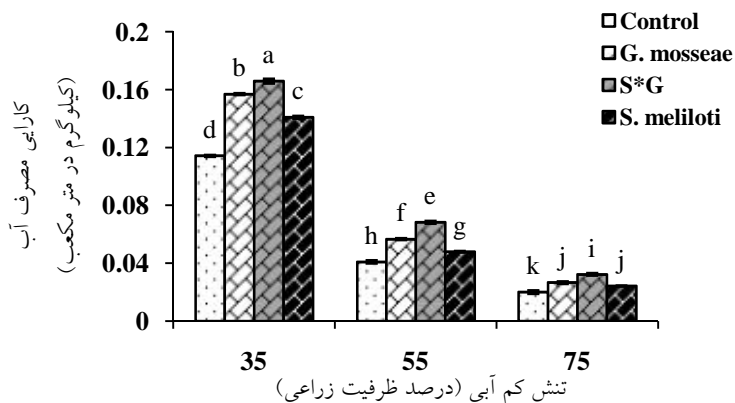
تلقیح	عنصر	همستگی (R ²)	ضرایب معادله رگرسیون				مدل
			b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	
Control	پتاسم	۰/۸۶۱	-۶۹۲۸	۲۱۳۴	-۱۶۳/۳	... ^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
	سدیم	۰/۹۹۳	-۶۸۲/۶	۵۶۳/۸	-۱۰۹/۲	... ^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
	فسفر	۰/۹۹۳	-۷۰/۴۳	۳۰/۲۶	....^{ns}	... ^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X
	آهن	۰/۹۷۸	۲۱۷۳۶۲	-۴۴۴۲۷۰	۳۰۲۶۲	-۶۸۷	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ² + b ₃ X ³
G. mossea	پتاسم	۰/۹۸۶	-۲۲۶/۵	۴۱/۰۵	....^{ns}	... ^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X
	سدیم	۰/۹۹۶	-۷۵۶/۱	۶۸۰/۳	-۱۴۱/۲	... ^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
	فسفر	۰/۹۹۸	۵۷۰/۹	-۲۴۶/۶	۲۸/۵۴	... ^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
	آهن	۰/۹۵۰	-۲۸۸۹۰	۳۷۹۹	-۱۲۴/۶	... ^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
S*G	پتاسم	۰/۹۷۸	۲۵۰/۴	۴۱/۶۱	....^{ns}	... ^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X
	سدیم	۰/۹۸۰	-۱۳۷/۸	۲۰۰/۹	-۵۳/۱۰	....^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
	فسفر	۰/۹۵۶	۱۱۴۹	۴۰۳/۷	۳۶/۰۹	....^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
	آهن	۰/۹۶۳	-۲۲۷۹۳	۲۹۵۴	-۹۵/۵۱	... ^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
S. meliloti	پتاسم	۰/۹۸۴	۱۴۵۳	-۴۷۳/۵	۳۹/۱۷	....^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
	سدیم	۰/۹۸۵	-۲۳۲/۴	۲۶۵/۲	-۶۳/۲۱	....^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
	فسفر	۰/۹۹۸	۵۰/۳۵	-۳۰/۹۰	۷/۰۲۵	....^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X + b ₂ X ²
	آهن	۰/۹۹۰	-۷۹۰/۷	۵۵/۶۵	....^{ns}	....^{ns}	Y = b ₀ + b ₁ X

شرایط تنش در گیاهان تلقیح شده با میکوریزا در دیگر پژوهش‌ها نیز دیده شده است (۳۱). نتایج نشان داد که تنش متوسط (۵۵٪ ظرفیت زراعی) موجب کاهش سهم هدایت روزنه‌ای در پیش‌بینی کارایی مصرف آب شد (کاهش R² از ۰/۹۲۵ به ۰/۹۰۶). ولی با شدت یافتن تنش (۳۵٪ ظرفیت زراعی) مجدداً سهم هدایت روزنه‌ای (R² = ۰/۹۲۸) افزایش یافت (شکل ۷). در واقع می‌توان گفت که تنش متوسط موجب افزایش میزان تبخیر و تعرق گیاه شده و باعث کاهش کارایی مصرف آب می‌گردد. ولی با تشدید تنش، روزنه‌ها به طور کامل بسته و میزان تبخیر و تعرق نیز کاهش می‌یابد.

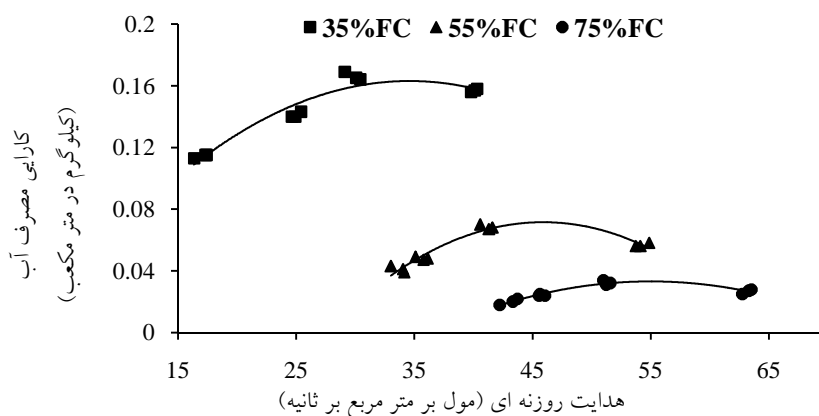
با مقایسه جذب پتاسیم و هدایت روزنه‌ای می‌توان گفت که تنش آبی موجب کاهش جذب پتاسیم شده و با توجه به نقش پتاسیم در باز و بسته شدن روزنه‌ها، با کاهش پتاسیم، روزنه‌ها بسته شده و میزان هدایت روزنه‌ای و تعرق کاهش و کارایی مصرف آب افزایش یافته است. معادلات رگرسیونی نیز

بذر و برهمکنش آنها قرار گرفت (۰/۱ = /، جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که طی تنش، کارایی مصرف آب افزایش پیدا کرد و تلقیح بذر نیز موجب بهبود کارایی مصرف آب گردید. تلقیح بذر با میکوریزا (*G. mossea*) در مقایسه با ریزوبیوم (*S. meliloti*) بر میزان کارایی مصرف آب تأثیر بیشتری نشان داد، به طوری که در تمام سطوح تنش آبی مقدار بیشتری به خود اختصاص داد. ولی با این وجود بیشترین کارایی مصرف آب در تلقیح ترکیبی میکوریزا و ریزوبیوم مشاهده گردید. بیشترین کارایی مصرف آب (۰/۱۶۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) از تیمار تلقیح ترکیبی در ۳۵٪ ظرفیت زراعی و کمترین مقدار (۰/۰۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز از عدم تلقیح در ۷۵٪ ظرفیت زراعی به دست آمد (شکل ۶).

تنش آبی موجب افزایش کارایی مصرف آب گردید. بیشترین کارایی مصرف آب متعلق به تلقیح دوگانه میکوریزا و ریزوبیوم می‌باشد. در تنش آبی، بیشترین کارایی مصرف آب در



شکل ۶. تأثیر محرک رشد کارایی مصرف آب یونجه در اثر تنش کم‌آبی. حروف متفاوت تیمارها نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در آزمون LSD سطح ۱٪ می‌باشند.



$$y (75\%FC) = -1E-04x^2 + 0.0105x - 0.2557$$

$$R^2 = 0.9252$$

$$y (55\%FC) = -0.0002x^2 + 0.0191x - 0.3675$$

$$R^2 = 0.9069$$

$$y (35\%FC) = -0.0002x^2 + 0.0113x - 0.0322$$

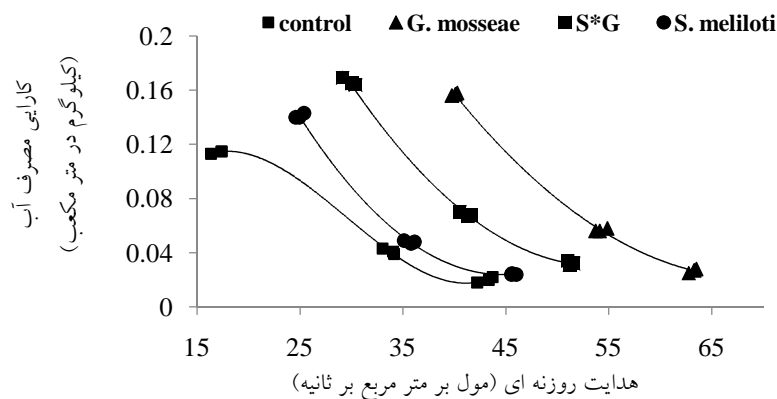
$$R^2 = 0.9284$$

شکل ۷. مدل‌های پیش‌بینی کارایی مصرف آب نسبت به میزان هدایت روزنه‌ای تحت تأثیر تنش آبی

رگرسیون، طی تیمارهای تلقیح، سهم هدایت روزنه‌ای در پیش‌بینی کارایی مصرف آب کاهش پیدا کرد (کاهش R^2 از ۰/۹۹۹ به ۰/۹۹۷ در تلقیح با میکوریزا و تلقیح ترکیبی و ۰/۹۹۵ در تلقیح با ریزوبیوم). در واقع باکتری‌های محرک رشد با افزایش راندمان جذب آب توسط ریشه و افزایش بهروری از آب بر رشد گیاه مؤثر بوده و از این طریق موجب بهبود کارایی مصرف آب می‌شوند (۷ و ۱۵). با توجه به این که طی تلقیح، سهم هدایت روزنه‌ای در پیش‌بینی کارایی مصرف آب کاهش

افزایش سهم پتاسیم در پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای طی تنش ۳۵٪ را تأیید می‌کنند (جدول ۴). همچنین، ممکن است طی تنش، تولید تنظیم‌کننده‌های سلولی موجب حفظ آماس سلول و فراهم شدن شرایط مناسب جهت رشد و تقسیم سلولی شده و موجب کاهش میزان تبخیر و تعرق شود و بر کارایی مصرف آب تأثیر بگذارد.

مشاهده شد که تلقیح بذرها با محرک‌های رشد موجب افزایش کارایی مصرف آب می‌شود. با توجه به معادلات



$$y(\text{control}) = 2E-05x^3 - 0.0014x^2 + 0.0348x - 0.1518$$

$$R^2 = 0.9995$$

$$y(\text{S.meliloti}) = 0.0003x^2 - 0.027x + 0.6255$$

$$R^2 = 0.9959$$

$$y(\text{G. mosseae}) = 0.0002x^2 - 0.0224x + 0.7927$$

$$R^2 = 0.9977$$

$$y(\text{S*G}) = 0.0002x^2 - 0.0251x + 0.7068$$

$$R^2 = 0.9979$$

شکل ۸. مدل‌های پیش‌بینی کارایی مصرف آب نسبت به میزان هدایت روزنه‌ای تحت تأثیر محرک رشد

با شدت یافتن تنش، سهم پتاسیم، سدیم و آهن افزایش ولی بر فسفر تأثیر معنی‌داری نداشت. همچنین، تلقیح بذر با باکتری موجب افزایش تحمل گیاه به شرایط تنش شد و جذب پتاسیم، فسفر و آهن بهبود یافته و هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب نیز افزایش یافت. در بین تیمارهای تلقیح همزمان میکوریزا (*G. mosseae*) و ریزوبیوم (*S. meliloti*) به علت وجود رابطه سینرژیستی با یکدیگر، بهترین نتیجه را نشان داد. طی تلقیح، سهم فسفر و پتاسیم در تنظیم هدایت روزنه‌ای افزایش و سهم سدیم کاهش یافت. تنش موجب افزایش نقش هدایت روزنه‌ای در افزایش کارایی مصرف آب شد. این در حالی است که در اثر تلقیح، سهم هدایت روزنه‌ای در کارایی مصرف آب کاهش پیدا کرد. بنابراین، با توجه به نتایج تغذیه مناسب گیاه، علاوه بر افزایش عملکرد، می‌تواند در استفاده بهینه از آب نقش مؤثری داشته باشد. همچنین، تغذیه گیاه با کودهای زیستی می‌تواند افزایش عملکرد و بهرووری مناسب از منابع و حفاظت از محیط زیست را به همراه داشته باشد.

یافت (شکل ۸)، می‌توان گفت که باکتری‌های محرک رشد از طریق کمک به تأمین آب، بیشتر بر رشد گیاه در مقایسه با هدایت روزنه‌ای تأثیر می‌گذارند. مطالعات نشان داده که طی تنش آبی کارایی مصرف آب کنگد افزایش پیدا کرد و همزیستی قارچ‌های میکوریزا (گونه *G. mosseae*) بیشترین تأثیر را در افزایش کارایی مصرف آب نشان داد. قارچ‌های میکوریزا با بهبود توسعه سیستم ریشه‌ای و در نتیجه فراهمی رطوبت و دسترسی عناصر غذایی موجب بهبود کارایی مصرف آب گردیده‌اند (۷).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش آبی موجب کاهش جذب پتاسیم، فسفر، آهن، افزایش جذب سدیم و افزایش کارایی مصرف آب و همچنین کاهش هدایت روزنه‌ای گردید. تنش ملایم موجب کاهش سهم عناصر در پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای شد. به طوری که R^2 پتاسیم، سدیم و آهن کاهش پیدا کرد. ولی

منابع مورد استفاده

۱. آرمزجو، ا.، م. حیدری و ا. قنبری. ۱۳۸۳. بررسی تنش خشکی و سه نوع کود بر عملکرد گل، پارامترهای فیزیولوژیک و جذب عناصر غذایی در گیاه بابونه (*Matricaria chamomilla L.*). فصل‌نامه تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران ۲۵(۴): ۴۸۲-۴۹۲.
۲. تاج‌آبادی‌پور، ا. ۱۳۸۳. تأثیر خاکی پتاسیم بر مقاومت نسبی سه رقم پسته به تنش آبی و شوری. رساله دکتری، دانشگاه شیراز.
۳. چوگان، ر. ۱۳۸۳. اصلاح ذرت برای تحمل به تنش خشکی و نیتروژن. (ترجمه)، انتشارات وزارت جهاد کشاورزی، ۹۵ صفحه.
۴. خسروی، ه. ۱۳۸۷. تأثیر باکتری‌های ریزوبیومی مولد ACC-DAMINAZ (PGPR) بر رشد گندم در شرایط شوری و خشکی. رساله دکتری در رشته خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
۵. ذبیحی، ح. ر.، غ. ثواقبی، ک. خاوازی و ه. گنجعلی. ۱۳۸۸. رشد و عملکرد گندم در پاسخ به تلقیح باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه در سطوح مختلف فسفر. پژوهش‌های زراعی ایران ۷(۱): ۴۱-۵۱.
۶. ساجدی، ن. و ف. رجالی. ۱۳۹۰. تأثیر تنش خشکی، کاربرد روی و تلقیح میکوریز بر جذب عناصر کم‌مصرف در ذرت. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) ۲۵(۲): ۵۶-۶۹.
۷. کوچکی، ع.، س. بخشایی، و. مختاری، س. خرم دل و ش. طاهرآبادی. ۱۳۹۲. تأثیر همزیستی با گونه‌های قارچ میکوریزا بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب کنجد (*Sesamum indicum L.*) تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری در شرایط مشهد. پژوهش‌های زراعی ایران ۱۱(۱): ۱-۱۷.
۸. وزان، س.، ر. رنجی، م. تهرانی، آ. قلاوند و م. صنایی. ۱۳۸۳. تأثیر تنش خشکی بر تجمع آب‌سزیک اسید و هدایت روزنه‌ای چغندر. علوم کشاورزی ایران ۳: ۱۷۶-۱۸۰.
۹. وفابخش، ج.، م. نصیری محلاتی، ع. کوچکی و م. عزیزی. ۱۳۸۸. اثر تنش خشکی بر کارایی مصرف آب و عملکرد ارقام کلزا. پژوهش‌های زراعی ایران ۷(۱): ۲۹۵-۳۰۲.
۱۰. صنایی، س. ۱۳۹۰. تأثیر نیتروژن معدنی بر رشد و کارایی مصرف نیتروژن در یونجه تحت شرایط خشکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زراعت، دانشگاه محقق اردبیلی، ۷۷ صفحه.
11. Allison, M.F., M.J. Armstrong, K.W. Jaggard, A.D. Todd and G.F.J. Milford. 2002. An analysis of the agronomic, economic and environmental effect of applying N fertilizer to sugar beet (*Beta Vulgaris L.*). J. Agric. Sci., Cambrige, 127: 475-486.
12. Baset Mía, M.A., Z.H. Shamsuddin and M. Maziah. 2010. Use of plant growth promoting bacteria in banana: A new insight for sustainable banana production. Int. J. Agric. Biol. 12(3): 459-467.
13. Bohnert, H.J., D.E. Nelson and R.G. Jensen. 1999. Adaptation to environmental stresses. The Plant Cell 7: 1099-1111.
14. Borgan, J.C. 2006. Flame photometric determination of calcium in plants. J. Sci. Food Agric. 11: 446-449.
15. Chen, B.D., X.L. Li, H.Q. Tao, P. Christie and M.H. Wong. 2003. The role of mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in a calcareous soil spiked with various quantities of zinc. Chemosphere 60(6): 839-846.
16. Claussen, W. 2002. Growth, water use efficiency, and proline of hydroponically grown tomato plants as affected by nitrogen source and nutrient concentration. Plant Soil 257: 199-209.
17. FAO. 2008. Climate change adaptation and mitigation: Challenges and opportunities for food security. Information document prepared for the High-Level Conference on World Food Security: The Challenges of Climate Change and Bioenergy, Rome.
18. Fitter, A. and R. Hay. 2002. Environmental Physiology of Plants. Academic Press, San Francisco, California.
19. Follett, R.H., L.S. Murphy and R.L. Donahue. 1991. Fertilizer and Soil Amendments. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 312 p.
20. Follows, R.J. and J.S. Boyer. 1996. Structure and activity of chloroplasts of sunflower leaves having various water potentials. Planta 132: 229-239.
21. Fuentes-Ramirez, L.E. and J. Caballero-Mellado. 2005. Bacterial biofertilizers. PP. 143-172. In: Siddiqui, Z.A. (Ed.), PGPR: Biocontrol and Biofertilization, Springer, The Netherlands.

22. Glick, B.R. 1995. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Can. J. Microbiol.* 41: 109-117.
23. Gosling, P., A. Hodge, G. Goodlass and G.D. Bending. 2006. Arbuscular mycorrhiza fungi and organic farming. *Agric. Ecosys. Environ.* 113: 17-35.
24. Graham, R.D. and M.J. Webb. 1991. Micronutrients and plant disease resistance and tolerance in plants. PP. 329-370. *In: Mortvedt, J.J., F.R. Cox, L.M. Shuman and R.M. Welch (Eds.), Micronutrients in Agriculture, SSSA Book Series No. 4, Madison, WI.*
25. Hamdia, M.A., M.A.K. Shaddad and M.M. Doaa. 2004. Mechanisms of salt tolerance and interactive effects of *Azospirillum brasilense* inoculation on maize cultivars grown under salt stress conditions. *Plant Growth Regul.* 44: 165-174.
26. Harris, D.C. 2003. *Quantitative Chemical Analysis.* 6th Edition, W.H. Freeman, 744 p.
27. Hussain, M.B., I. Mehboob, Z.A. Zahir, M. Naveed and H.N. Asghar. 2009. Potential of Rhizobium spp. for improving growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Soil Environ.* 28(1): 49-55.
28. Jones, H.G. 2001. Drought tolerance and water-use efficiency. PP. 193-202. *In: Smith, J.A.C. and H. Griffillis (Eds.), Plant Responses from Cell to Community, Bios Scientific Publishers.*
29. Mehboob, I., M. Naveed and A.Z. Zahir. 2009. Rhizobial association with non-legumes: Mechanisms and applications. *Crit. Rev. Plant Sci.* 28: 432-456.
30. Nadeem, S.M., Z.A. Zahir, M. Naveed, M. Arshad and S.M. Shahzad. 2006. Variation in growth and ion uptake of maize due to inoculation with plant growth promoting rhizobacteria under salt stress. *Plant Soil Environ.* 25: 78-84.
31. Nagarathna, T.K., T.G. Prasad, D.J. Bagyaraj and Y.G. Shadakshari. 2007. Effect of arbuscular mycorrhiza and phosphorus levels on growth and water use efficiency in sunflower at different soil moisture status. *J. Agric. Technol.* 3(2): 221-229.
32. Patakas, A., N. Nikolaou, E. Zioziou, K. Radoglou and B. Noitsakis. 2002. The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought stressed grapevines. *Plant Sci.* 163: 361-367.
33. Riahinia, S.H., H.R. Khazaei, M. Kafi and A. Nezami. 2013. Effects of water stress and nitrogen levels on relative water content, chlorophyll fluorescence and membrane stability index in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Res. Crops* 14: 88-94.
34. Shimshi, D., M.L. Mayoral and D. Atsmond. 1999. Response to water stress in wheat and related wild species. *Crop Sci.* 22: 123-128.
35. Singh, S. and K.K. Kapoor. 1999. Inoculation with phosphate-solubilizing microorganisms and a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus improves dry matter yield and nutrient uptake by wheat grown in a sandy soil. *Biol. Fertil. Soils* 28: 139-144.
36. Soliman, A.S.H., T. Shanan Nermeen, N.O. Massoud and D.M. Swelim. 2011. Improving salinity tolerance of *Acacia saligna* (Labill.) plant by arbuscular mycorrhizal fungi and Rhizobium inoculation. *Afr. J. Biotechnol.* 11(5): 1259-1266.
37. Stanhill, G. 1986. Water use efficiency. *Adv. Agron.* 39: 53-85.
38. Sunkar, R., D. Bartels and H.H. Kirch. 2003. Overexpression of a stress-inducible dehydrogenase gene from *Arabidopsis thaliana* in transgenic plants improves stress tolerance. *Plant J.* 35(4): 452-464.
39. Troughton, A. 1957. *The underground organs of herbage grasses.* Farnham Royal, Bucks, Commonwealth Agricultural Bureaux, England.
40. Yordanov, I., V. Velikova and T. Tsonev. 2003. Plant responses to drought and stress tolerance. *Bulg. J. Plant Physiol, Special issue* pp. 187-206.