



Response of Faba bean (*Vicia faba* L.) to different phosphorus levels and arbuscular mycorrhizal inoculation under drought stress conditions

Soroush Sarafrazi

MSc. Student, Department of Chemistry, Soil Fertility and Plant Nutrition, Islamic Azad University, Darab Branch, Darab, Iran
Sorosarf@gmail.com

Hasan Haghighatnia

Assistant Professor, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Fars Province, Soil and Water Research
Department, Darab, Iran

Hasan.haghighatnia@yahoo.com

Abstract

This greenhouse research aimed to investigate the effect of drought stress, phosphorus, and mycorrhizal inoculation on morphological, physiological, and nutrient uptake indices in plants in Darab, Iran. The experiment was conducted as a factorial experiment with 3 drought stress treatments (normal irrigation, moderate stress, and severe stress), phosphorus at three levels (0, 10, and 20 mg/kg soil), and arbuscular mycorrhizal fungus at three levels (0, 75, and 150 g) in 2023. The results showed that drought stress significantly affected plant growth and development, so that at the maximum stress level, leaf number, stem height, leaf area, and chlorophyll index decreased by 51.8%, 36.3%, 40.5%, and 40.4%, respectively, compared to normal conditions. Also, shoot and root dry weights significantly decreased, indicating a reduction in water and organic matter content in plant tissues. With increasing phosphorus levels, a significant improvement was observed in morphological and physiological indices of the plant, and leaf number, stem height, leaf area, and chlorophyll index increased by 37.4, 15.02, 19.05, and 26.5%, respectively. The greatest change was observed in the number of leaves, which indicates the important role of phosphorus in the production of new leaves and the development of the plant's vegetative system. The use of mycorrhizal fungi increased leaf number, stem height, leaf area, and chlorophyll index by 12.3, 4.97, 5.7, and 9.5%, respectively. Under stress conditions, plants inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi showed improved growth characteristics and increased nutrient uptake, especially for phosphorus. Mycorrhizal dependency showed the maximum level under moderate stress conditions and decreased with increasing stress intensity and under normal irrigation conditions. Increasing phosphorus levels also increased mycorrhizal dependency. The results of this research showed that although drought stress has a significant negative effect on plant growth and development, increasing phosphorus levels and the use of mycorrhizal fungi can greatly reduce these negative effects.

Keywords: water limitation, phosphorus, mycorrhiza, morphological indices



بررسی برهمکنش قارچ میکوریزا آربسکولار و سطوح مختلف فسفر بر گیاه باقلا (*Vicia faba* L.) تحت شرایط تنش خشکی

سروش سرفرازی^۱، حسن حقیقت نیا^۲.

۱_ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب. بخش شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب،
فارس، sorosarf@gmail.com

۲_ استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس. بخش تحقیقات خاک و آب، داراب، ایران.
Hasan.haghighatnia@yahoo.com

چکیده:

این پژوهش گلخانه‌ای باهدف بررسی اثر تنش خشکی، سطوح مختلف فسفر و تلقیح میکوریزایی بر شاخص‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و جذب عناصر غذایی در گیاه در شهرستان داراب در قالب یک آزمایش فاکتوریل با ۳ تیمار تنش خشکی در سه سطح (آبیاری نرمال، تنش متوسط و تنش شدید) فسفر در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) و قارچ میکوریزا آربسکولار در سه سطح (صفر، ۷۵ و ۱۵۰ گرم) در سال ۱۴۰۲ انجام شد. نتایج نشان داد که تنش خشکی به‌طور قابل توجهی رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به‌طوری‌که در سطح تنش حداکثر، تعداد برگ، ارتفاع ساقه، سطح برگ و شاخص کلروفیل به ترتیب ۵۱/۸، ۳۶/۳، ۴۰/۵ و ۴۰/۴ درصد نسبت به شرایط نرمال کاهش یافت. همچنین، وزن خشک اندام هوایی و ریشه نیز به‌طور قابل توجهی کاهش یافت که نشان دهنده کاهش میزان آب و مواد آلی در بافت‌های گیاه است. علاوه بر این، تنش خشکی باعث کاهش جذب و انتقال فسفر در گیاه شد، به‌طوری‌که غلظت فسفر به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. با افزایش سطح فسفر، بهبود قابل توجهی در شاخص‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه مشاهده شد. به‌طوری‌که تعداد برگ، ارتفاع ساقه، سطح برگ و شاخص کلروفیل به ترتیب ۳۷/۴، ۱۵/۰۲، ۱۹/۰۵ و ۲۶/۵ درصد افزایش یافت. بیشترین تغییر در تعداد برگ گیاه مشاهده شد که نشان دهنده نقش مهم فسفر در تولید برگ‌های جدید و توسعه سیستم ریشی گیاه است. استفاده از قارچ‌های میکوریزا نیز باعث افزایش شاخص‌های مورفولوژیکی و شاخص کلروفیل گیاه شد. به‌طوری‌که تعداد برگ، ارتفاع ساقه، سطح برگ و شاخص کلروفیل به ترتیب ۱۲/۳، ۴/۹۷، ۵/۷ و ۹/۵ درصد افزایش یافت. بیشترین تأثیر میکوریزا بر تعداد برگ گیاه بود که نشان دهنده نقش مهم میکوریزا در افزایش جذب فسفر و بهبود رشد سیستم ریشی گیاه است. در شرایط تنش آبی، گیاهان تلقیح شده با قارچ‌های میکوریزا آربسکولار ویژگی‌های رشد بهبود یافته و جذب مواد مغذی افزایش یافته، به‌ویژه برای فسفر را نشان دادند. وابستگی میکوریزایی در شرایط تنش متوسط حداکثر میزان را نشان داد و با افزایش شدت تنش و در شرایط آبیاری نرمال کاهش یافت. افزایش فسفر نیز باعث افزایش وابستگی میکوریزایی شد، به‌طوری‌که، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تنش خشکی تأثیر منفی قابل توجهی بر رشد و نمو گیاه دارد، اما افزایش سطح فسفر و استفاده از قارچ‌های میکوریزا می‌تواند تا حد زیادی این اثرات منفی را کاهش دهد.

کلمات کلیدی: تنش خشکی، فسفر، میکوریزا، شاخص‌های مورفولوژیک، محتوای عناصر



بیان مسئله و اهمیت موضوع:

بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی ایران، در سال زراعی ۱۴۰۱ سطح زیر کشت باقلا در کشور ما ایران ۳۰۰۰۰ هکتار با متوسط عملکرد ۵ تن در هکتار (سبز) و میزان تولید سالیانه ۱۵۰۰۰ تن بوده است.

باقلا (*Vicia faba* L) به عنوان یکی از مهم‌ترین حبوبات در تغذیه انسانی و دامی، به دلیل ارزش غذایی بالا و نقش آن در تناوب زراعی و بهبود ساختار خاک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این حال، تولید این محصول در بسیاری از مناطق جهان، به ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، به طور فزاینده‌ای تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد. تنش خشکی به عنوان یک عامل محدودکننده اصلی، می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر در رشد، عملکرد و کیفیت دانه باقلا شود. از سوی دیگر، استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید خاک، به ویژه قارچ‌های میکوریز آربوسکولار (AMF)، به عنوان یک راهکار بیولوژیک و پایدار برای افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته است. قارچ‌های میکوریز با ایجاد یک رابطه همزیستی با ریشه گیاهان، می‌توانند جذب آب و مواد مغذی، به ویژه فسفر، را بهبود بخشیده و در نتیجه، تحمل گیاه به تنش خشکی را افزایش دهند (Yang et al., ۲۰۲۳). تحقیقات متعددی اثرات مثبت میکوریز بر گیاهان مختلف تحت تنش خشکی را نشان داده‌اند، اما بررسی دقیق و جامع این اثرات بر گیاه باقلا، به ویژه در شرایط مزرعه‌ای و با در نظر گرفتن سطوح مختلف تنش، همچنان نیازمند مطالعات بیشتری است.

این بررسی با هدف مطالعه متقابل تنش خشکی و فسفر در سطوح مختلف و تلقیح با قارچ میکوریز آربوسکولار بر ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و جذب عناصر در گیاه باقلا طراحی و اجرا شد و تأثیر سطوح مختلف این عوامل بر شاخص‌های رشد (ارتفاع ساقه، تعداد برگ، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه)، شاخص کلروفیل، جذب عناصر و وابستگی میکوریزایی در گیاه باقلا اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل شد.

طراحی و اجرای این پژوهش با فرضی بر اینکه تنش خشکی در سطوح مختلف، منجر به کاهش معنادار در شاخص‌های مورد بررسی خواهد شد، رشد و تلقیح گیاه باقلا با قارچ میکوریز آربوسکولار، اثرات منفی این تنش را کاهش خواهد داد دادو همچنین توجه به افزایش وابستگی میکوریزایی در اثر تنش خشکی و افزایش فسفر انجام شد.

این پژوهش با ارائه اطلاعات جامع در مورد اثرات تنش خشکی و نقش میکوریزا در بهبود تحمل گیاه باقلا، می‌تواند راهکارهای مناسبی برای مدیریت پایدار تولید این محصول در مناطق مستعد خشکی ارائه نماید.

مبانی تحقیق

قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار در شاخه گلومرومیکوتا قرار دارند و فراوان‌ترین عوامل ایجادکننده همزیستی در خاک هستند از این رو، اهمیت اکولوژیکی و اقتصادی فراوانی دارند (AjemaGebisa, ۲۰۲۴). این دسته از قارچ‌ها به‌طور همزیست اجباری با ریشه گیاهان ارتباط برقرار می‌کنند و بخشی از مواد غذایی لازم برای آن‌ها را از طریق هیف‌های خود فراهم می‌کنند از سوی دیگر، این قارچ‌ها برای رشد و تکمیل چرخه زندگی خود به ریشه و سلول‌های گیاه میزبان وابسته‌اند (Wahab et al., ۲۰۲۳) پژوهش‌ها نشان می‌دهند حدود



این قارچ‌ها قادر به ایجاد رابطه همزیستی با اغلب گیاهان آوندی هستند. این موضوع بیانگر آن است که با انتخاب و بکارگیری بهترین ترکیب گیاه میزبان و قارچ همزیست می‌توان به نحو موثری از این همزیستی در افزایش تولید محصولات کشاورزی استفاده کرد.

گیاهانی که دارای همزیستی میکوریزی می‌باشند بدلیل اینکه عناصر غذایی و آب بیشتری از خاک جذب می‌کنند دارای رشد بهتری خواهند بود، عملکرد بیشتری خواهند داشت و نیز مقاومت بیشتری در برابر تنش‌های زنده (عوامل بیماری‌زا که ریشه گیاهان را مورد حمله قرار می‌دهند) و غیر زنده (خشکی، سرما و شوری) از خود نشان می‌دهند. بنابر این استفاده از آن‌ها به عنوان یکی از استراتژی‌های نوین و مهم جهت مقابله با تنش خشکی می‌تواند باعث صرفه جویی زیادی در مصرف آب گردد. تحقیقات زیادی نشان داده است که همزیستی میکوریزی مقاومت گیاه میزبان را به شرایط خشکی افزایش می‌دهد. اما ساز و کارهای آن هنوز مورد بحث بوده، اگر چه آثار آن بیشتر به تغییرات تغذیه‌ای در گیاه میزبان نسبت داده شده است.

این قارچ‌ها با تشکیل شبکه‌های گسترده هیفال در خاک به جذب فسفر کمک می‌کنند. مکانیسم‌های جذب فسفر توسط قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار شامل شبکه‌های هیفال است که هیفای خارج آرادیکال تولید می‌کنند که به داخل خاک گسترش می‌یابد و حجم خاک مورد بررسی برای جذب فسفر را افزایش می‌دهد (Jin et al., 2024). این فرآیند به گیاهان کمک می‌کند تا فسفر بیشتری از خاک جذب کنند. همچنین، قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار با ترشح آنزیم‌ها و ترشحات ریشه، فسفر آلی را به اشکال معدنی قابل جذب تبدیل می‌کنند (Zhu et al., 2025).

گیاه باقلا، مانند بسیاری از حبوبات، عمدتاً با میکوریزای آربوسکولار ارتباط همزیستی برقرار می‌کند (Ardakani et al., 2014) در مقابل، میکوریزای اکتومیکوریزال، با تشکیل یک شبکه هیفی در اطراف ریشه‌ها و بین سلول‌های قشری، مشخص می‌شود و بیشتر در درختان جنگلی دیده می‌شود (Martin et al., 2017) اهمیت میکوریزای آربوسکولار در کشاورزی پایدار به دلیل نقش آن در افزایش دسترسی گیاه به مواد مغذی، به‌ویژه فسفر و بهبود مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی است (Rai, 2006).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که استفاده از میکوریزا می‌تواند رشد رویشی حبوبات را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (Beltayef et al., 2023). این افزایش رشد در پارامترهای مختلفی مانند وزن خشک ساقه و برگ‌ها، ارتفاع گیاه و تعداد برگ‌ها قابل‌مشاهده است. این تأثیر مثبت به دلیل افزایش جذب مواد مغذی و آب توسط میکوریزا است که منجر به افزایش فتوسنتز و تولید زیست‌توده می‌شود (Beltayef et al., 2023). به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط اردکانی و همکاران (2014) انجام شد، نشان داده شد که تلقیح میکوریزا به‌طور قابل‌توجهی وزن خشک شاخه و ریشه باقلا را افزایش می‌دهد. این افزایش وزن خشک، نشان‌دهنده افزایش رشد رویشی گیاه است که به دلیل دسترسی بهتر به مواد مغذی، به‌ویژه فسفر، هست. همچنین، برخی مطالعات نشان داده‌اند که میکوریزا می‌تواند بر روی تولید هورمون‌های گیاهی مانند اکسین و سیتوکینین نیز تأثیر داشته باشد که می‌تواند در رشد رویشی گیاه نقش داشته باشد (Rai, 2006).

استفاده از میکوریزا می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر رشد، تغذیه، عملکرد و مقاومت به تنش‌های محیطی گیاه باقلا داشته باشد. میکوریزا با افزایش جذب مواد مغذی، به‌ویژه فسفر، افزایش جذب آب، افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی و بهبود تعامل با سایر میکروارگانیسم‌های خاک، می‌تواند به افزایش عملکرد و کیفیت دانه‌های باقلا کمک کند. انتخاب گونه مناسب میکوریزا و توجه به شرایط محیطی برای دستیابی به بهترین نتیجه بسیار مهم است.



مطالعات بیشتری برای بررسی تأثیر گونه‌های مختلف میکوریزا و شرایط محیطی مختلف بر روی باقلا و همچنین بررسی تعاملات پیچیده میکوریزا با سایر میکروارگانیسم‌های خاک، مورد نیاز است. استفاده از میکوریزا به عنوان یک روش کشاورزی پایدار، می‌تواند به افزایش تولید باقلا و بهبود حاصلخیزی خاک کمک کند.

روش تحقیق

این آزمایش بصورت گلخانه ای در ایستگاه تحقیقاتی بختاجرد داراب واقع در ۲۵۰ کیلومتری جنوب شرق شیراز با ارتفاع ۱۱۱۰ متر از سطح دریا و طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی به صورت فاکتوریل 3×3 در چهار تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا گردید. عوامل استفاده شده در آزمایش شامل تلقیح با قارچ آربسکولار گونه گلوموس موسه (*Glomus mosseae*) در سه سطح ۱- شاهد بدون تلقیح و ۲ و ۳- به ترتیب تلقیح با ۷۵ و ۱۵۰ گرم از مایه تلقیح قارچ میکوریزا، تنش خشکی در سه سطح شامل ۱- بدون تنش، ۲- تنش متوسط و ۳ تنش شدید (به صورت درصد هایی از رطوبت قابل استفاده گیاه بر اساس ضرایب تخلیه مجاز رطوبتی به ترتیب ۰/۴، ۰/۵۵ و ۰/۷) و سطوح مختلف فسفر در سه سطح صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک از منبع کود سوپر فسفات تربیل بود.

برای اجرای آزمایش، ابتدا گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۲۰ و ارتفاع ۲۵ سانتیمتر با بستری شامل خاک مزرعه و ماسه به نسبت ۲ به ۱ و با وزن دقیق و یکسان برای همه گلدان‌ها پر شد. سپس با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش خاک و نیاز کودی باقلا، کمبود عناصر غذایی با اضافه کردن مقادیر کافی آن عناصر به خاک افزوده شد. برای ایجاد شرایط مناسب از نظر زهکشی، در زیر گلدان‌ها سوراخ‌هایی تعبیه و در کف آن‌ها به میزان ۲ سانتی متر سنگریزه با قطر ۶-۴ میلی متر ریخته شد. برای هر گلدان ۸ کیلوگرم خاک در نظر گرفته شد. در این بررسی بوته های چهار برگی باقلا رقم شوشتری کاشته شده در گلدان های پلاستیکی و از لحاظ ظاهری کاملاً یکسان بودند انتخاب و به گلدان‌های اصلی خاک انتقال داده شد. هم‌زمان با این کار عمل تلقیح با مایه تلقیح قارچ‌های مورد نظر مطابق تیمارها صورت گرفت. دو هفته پس از انتقال گیاه چه ها به هر گلدان، تنش خشکی اعمال شد. بدین صورت که پس از محاسبه میزان آب قابل استفاده گیاه، بر اساس کسری از ضرایب تخلیه رطوبتی (MAD^1) یعنی ۴۰٪ (بدون تنش) ۵۵٪ (تنش متوسط) و ۷۰٪ (تنش شدید) و با توزین روزانه گلدان ها مقدار آب مناسب هر تیمار را تا رسیدن رطوبت به حد ۸۵٪ ظرفیت زراعی (F.C.) محاسبه و اضافه گردید. آزمایش به مدت ۹۰ روز (تا قبل از گلدهی باقلا) ادامه یافت و در پایان دوره آزمایش ویژگی های رشد رویشی مانند ارتفاع، قطر طوقه و تعداد برگ و وزن تر و خشک اندام های هوایی و ریشه‌ها به طور جداگانه اندازه گیری شد (اندازه گیری وزن خشک، با قرار دادن در آون در درجه حرارت ۶۵ درجه سانتیگراد تا رسیدن به وزن ثابت صورت گرفت). همچنین در پایان آزمایش شاخص کلروفیل برگ با دستگاه SPAD مدل ۰۱-CL اندازه گیری شد. همچنین وابستگی میکوریزایی (*Mycorrhizal dependency*) از طریق تفريق وزن ماده خشک نهال شاهد میکوریزایی نشده از وزن ماده خشک نهال میکوریزایی شده به وزن ماده خشک نهال شاهد ضربدر ۱۰۰ اندازه گیری شد.

برای اندازه گیری فسفر برگ، با روش عصاره گیری (Dry ashing) خشک سوزانی انجام و با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV-۲۱۰۰، غلظت فسفر برگ بر اساس رنگ سنجی با روش زرد (Subramanian and Charest, ۱۹۹۷) اندازه گیری گردید. در

¹ Management Allowed Depletion



مطالعات مهندسی کشاورزی زراعت و اصلاح نباتات

7th International Conference on
Studies of Agricultural Engineering
Farming and Plant Breeding

نهایت با استفاده از نرم افزار آماری MSTATC تجزیه ای آماری انجام و مقایسه میانگین ها با آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ صورت گرفت.

یافته ها

تعداد برگ باقلا

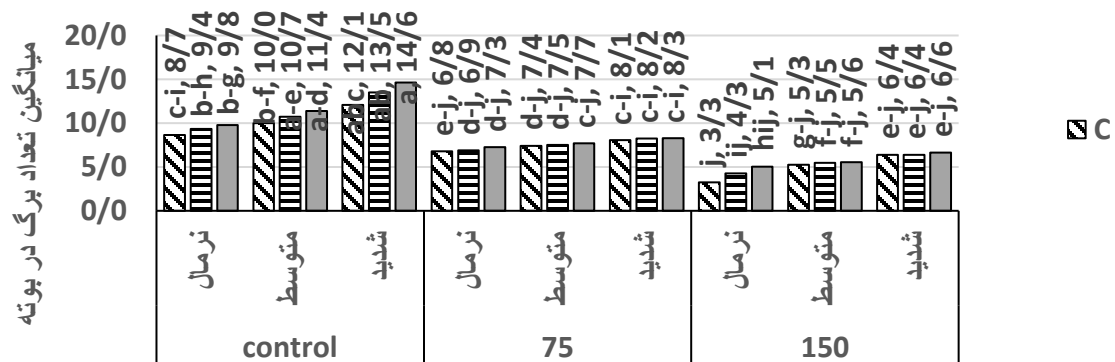
نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار عوامل موردبررسی بر تعداد برگ بود. بر اساس این نتایج اثر متقابل دو و سه‌گانه عوامل موردبررسی بر تعداد برگ معنی‌دار بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد میانگین تعداد برگ در هر بوته با افزایش تنش خشکی کاهش یافت. این میزان کاهش در تنش‌های متوسط و شدید به ترتیب ۳۲ و ۵۱/۸ درصد نسبت به شاهد بود.

استفاده از میکوریزا باعث افزایش میانگین تعداد برگ در بوته‌های باقلا شد. استفاده از میکوریزا به میزان ۷۵ و ۱۵۰ گرم مایه تلقیح میکوریزا باعث افزایش متوسط تعداد برگ به میزان ۶/۶ و ۱۲/۴ درصد نسبت به شاهد بدون استفاده از میکوریزا شد. افزودن فسفر به خاک باعث افزایش تعداد برگ در باقلا شد این افزایش در سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم فسفر به ترتیب ۱۹/۹ و ۳۴/۷ درصد نسبت به شاهد بدون کود فسفره شد.

افزایش فسفر در هر سطح تنش باعث افزایش تعداد برگ در گیاه شد. این افزایش برای سطح ۲۰ میلی‌گرم فسفر در شرایط نرمال، تنش متوسط و حداکثر تنش به ترتیب ۴۴/۷، ۴۵/۸ و ۵۴/۷ درصد بود همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد افزایش سطح فسفر توانست بر روند افزایش تعداد برگ در شرایط تنش اثر مثبت داشته باشد. بیشترین میانگین تعداد برگ در این بررسی از برهم‌کنش سطوح ۲۰ میلی‌گرم فسفر در شرایط حداقل تنش با متوسط ۱۳/۴ عدد برگ در هر بوته به دست آمد.

برهم‌کنش استفاده از میکوریزا و تنش خشکی نشان داد بیشترین تعداد برگ با متوسط ۱۲ عدد برگ در هر بوته متعلق به تیمار ۱۵۰ گرم میکوریزا در شرایط تنش حداقل بوده است. با افزایش تنش هرچند که از تعداد برگ در هر بوته کاسته شد اما افزایش سطح میکوریزا توانست این کاهش را جبران کند به‌نحوی که در شرایط تنش حداکثر استفاده از میکوریزا به میزان ۷۵ و ۱۵۰ گرم باعث افزایش تعداد برگ به میزان ۸/۲ و ۱۵/۸ درصد شد.

بیشترین تعداد برگ از برهم‌کنش سه‌گانه ۱۵۰ گرم میکوریزا، ۲۰ میلی‌گرم فسفر در شرایط آبیاری نرمال به دست آمد. در هر سطح تنش افزودن میکوریزا و فسفر توانست باعث افزایش تعداد برگ شود هرچند هیچ‌یک از تیمارهای میکوریزا و فسفر نتوانست تعداد برگ را در به میزان شرایط آبیاری نرمال افزایش دهد؛ و باعث جلوگیری از خسارت ایجادشده توسط تنش شود (شکل ۱).

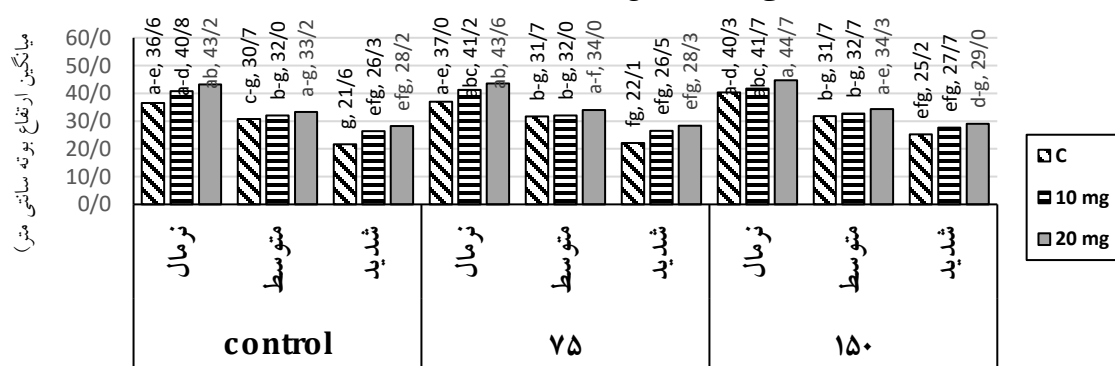


شکل ۱- اثر متقابل تنش خشکی، فسفر و میکوریزا بر میانگین تعداد برگ در گیاه باقلا

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌دار آماری ندارند (دانکن ۵٪)

ارتفاع بوته

ارتفاع بوته بر اساس نتایج تجزیه واریانس تحت تأثیر معنی‌دار عوامل مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس این نتایج کلیه اثرات متقابل دو و سه‌گانه این عوامل بر تعداد برگ معنی‌دار بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد میانگین ارتفاع بوته با افزایش تنش خشکی کاهش یافت. این میزان کاهش در تنش‌های متوسط و شدید به ترتیب ۲۰/۷ و ۳۶/۳ درصد نسبت به شاهد بود. استفاده از میکوریزا باعث افزایش میانگین ارتفاع بوته در بوته‌های باقلا شد. استفاده از میکوریزا به میزان ۷۵ و ۱۵۰ گرم مایه تلقیح میکوریزا باعث افزایش میانگین ارتفاع بوته به میزان ۱/۳ و ۵ درصد نسبت به شاهد بدون استفاده از میکوریزا شد. افزودن فسفر به خاک باعث افزایش میانگین ارتفاع بوته در باقلا شد این افزایش در سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم فسفر به ترتیب ۸/۶ و ۱۵ درصد نسبت به شاهد بدون کود فسفر شد افزایش فسفر در هر سطح تنش باعث افزایش میانگین ارتفاع بوته در گیاه شد. این افزایش برای سطح ۲۰ میلی‌گرم فسفر در شرایط نرمال، تنش متوسط و حداکثر تنش به ترتیب ۲۴/۱۱، ۷/۸۸ و ۱۵/۴۴ درصد نسبت به شاهد بدون فسفر بود. بر اساس این نتایج افزایش سطح فسفر توانست بر ارتفاع بوته در شرایط تنش اثر مثبت داشته باشد. بیشترین میانگین ارتفاع بوته در این بررسی از برهم‌کنش سطوح ۲۰ میلی‌گرم فسفر در شرایط حداقل تنش با متوسط ۲۱/۹۱ سانتی‌متر به دست آمد. برهم‌کنش استفاده از میکوریزا و تنش خشکی نشان داد بیشترین میانگین ارتفاع بوته با متوسط ۲۱/۱۱ سانتی‌متر به تیمار ۱۵۰ گرم میکوریزا در شرایط بدون تنش بوده است در هیچ‌یک از شرایط تنش نرمال و متوسط در حضور سطوح پیش‌بینی‌شده میکوریزا اختلاف معنی‌دار بین تیمارها مشاهده نشد. بیشترین میانگین ارتفاع بوته در آزمایش حاضر از برهم‌کنش سه‌گانه استفاده از ۱۵۰ گرم میکوریزا، ۲۰ میلی‌گرم فسفر در شرایط آبیاری نرمال به دست آمد (۲۲/۳ سانتی‌متر). نتایج بررسی برهم‌کنش سه‌گانه عوامل مورد بررسی نشان داد در شرایط آبیاری نرمال سایر عوامل نتوانستند تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع بوته باقلا داشته باشند (شکل ۳)



شکل ۲- اثر متقابل تنش خشکی، فسفر و میکوریزا بر ارتفاع بوته گیاه باقلا

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌دار آماری ندارند (دانکن ۵٪)

سطح برگ باقلا



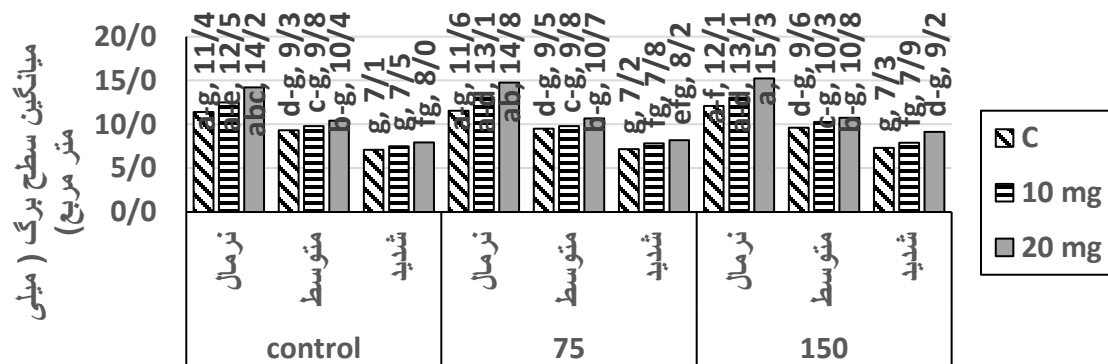
مطالعات مهندسی کشاورزی زراعت و اصلاح نباتات

7th International Conference on
Studies of Agricultural Engineering
Farming and Plant Breeding

بر اساس نتایج تجزیه واریانس کلیه اثرات ساده و متقابل دو و سه‌گانه عوامل موردبررسی بر سطح برگ باقلا اثر معنی‌دار داشتند. نتایج نشان داد میانگین سطح برگ باقلا با افزایش تنش خشکی به‌طور معنی‌دار کاهش یافته است. کاهش سطح برگ در اثر تنش متوسط و شدید به ترتیب ۲۳/۴۷ و ۴۰/۵۲ درصد نسبت به شاهد بدون تنش بود. افزایش میکوریزا در مقادیر پیش بینی شده در آزمایش حاضر سطح برگ را افزایش داد. سطح برگ در غلظت‌های ۷۵ و ۱۵۰ گرم میکوریزا به ترتیب ۲/۵ و ۵/۷ درصد سطح برگ بوته‌های باقلا را افزایش داد. افزودن فسفر در مقادیر ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر هر کیلوگرم خاک باعث افزایش ۷/۷ و ۱۹/۱ درصدی سطح برگ باقلا شد.

میانگین سطح برگ باقلا با افزودن میکوریزا در هر سطح فسفر افزایش یافت این افزایش در سطح ۱۵۰ گرم میکوریزا نسبت شاهد بدون تنش به ترتیب با صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم فسفر به ترتیب ۴/۴، ۴/۸ و ۷/۹ درصد بود این نتایج حاکی از اثر مثبت فسفر در توانایی میکوریزا برای افزایش سطح برگ باقلا می‌باشد

برهم‌کنش سه‌گانه عوامل موردبررسی بر سطح برگ باقلا نشان داد بیشترین میزان سطح برگ متعلق به برهم‌کنش سه‌گانه تنش نرمال، ۲۰ میلی‌گرم فسفر و ۱۵۰ گرم میکوریزا بوده است. در هر سطح تنش بیشترین سطح برگ از برهم‌کنش دوگانه ۲۰ میلی‌گرم فسفر و ۱۵۰ گرم میکوریزا به‌دست آمده است؛ که بدون اختلاف معنی‌دار با تیمار برتر در یک گروه آماری قرار گرفتند (شکل ۳).



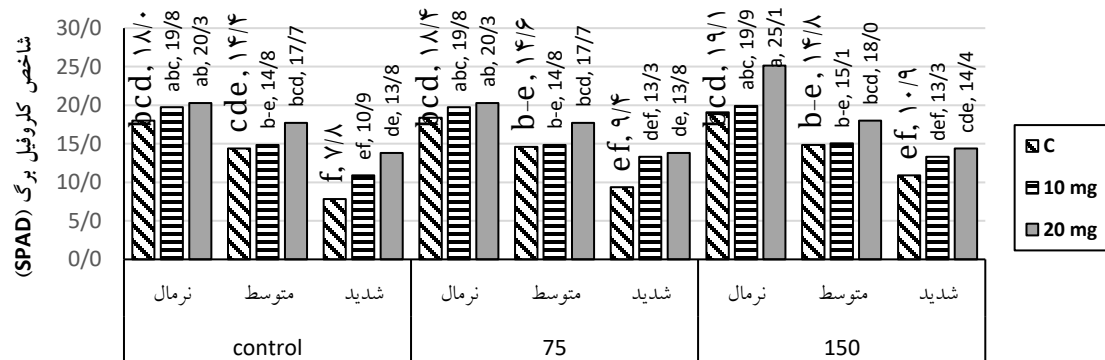
شکل ۳- اثر متقابل تنش خشکی، فسفر و میکوریزا بر میانگین سطح برگ گیاه باقلا
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌دار آماری ندارند (دانکن ۵٪)

شاخص کلروفیل برگ گیاه باقلا

بررسی نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار کلیه عوامل موردبررسی و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر شاخص کلروفیل برگ باقلا بود. تنش خشکی در سطوح متوسط و شدید باعث کاهش شاخص کلروفیل به ترتیب به میزان ۲۱/۴۱ و ۴۰/۴۲ درصد شد. استفاده از میکوریزا شاخص کلروفیل برگ را به‌طور معنی‌دار افزایش داد این میزان افزایش برای سطوح ۷۵ و ۱۵۰ گرم میکوریزا به ترتیب ۱۱/۲۴ و ۲۶/۵۵ درصد نسبت به شاهد بود. افزایش فسفر برای سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر هر کیلوگرم خاک باعث افزایش معنی‌دار شاخص سطح برگ باقلا به میزان به ترتیب ۳/۲۶ و ۹/۵ درصد نسبت به شاهد بدون فسفر شد. شکل ۴ نشان‌دهنده



اثر متقابل سه‌گانه عوامل موردبررسی بر شاخص کلروفیل برگ می‌باشد. بر اساس این نتایج بیشترین میزان شاخص کلروفیل برگ از برهم‌کنش سطوح نرمال آبیاری ۱۵۰ گرم میکوریزا و ۲۰ گرم فسفر به دست آمد (۲۵/۱۳ واحد) نتایج به‌دست‌آمده نشان داد در شرایط آبیاری نرمال اختلاف معنی‌دار بین برهم‌کنش سایر سطوح فسفر و میکوریزا بر شاخص کلروفیل برگ وجود ندارد. کمترین میزان شاخص کلروفیل نیز از شرایط تنش حداقل به دست آمد و برهم‌کنش سطوح میکوریزا و فسفر نتوانست تأثیر معنی‌داری بر آن داشته باشد.



شکل ۴- اثر متقابل تنش خشکی، فسفر و میکوریزا بر میانگین شاخص کلروفیل برگ گیاه با قلا میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌دار آماری ندارند (دانکن ۰.۵٪)

وزن خشک ریشه و اندام هوایی

وزن خشک ریشه بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر سطوح تنش قرار گرفت. بیشترین وزن خشک ریشه در شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۵/۶۹ گرم به دست آمد. تنش شدید باعث کاهش معنی‌دار این دو شاخص به میزان ۵۵/۶ درصد نسبت به شرایط آبیاری نرمال شد. بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس خشک ریشه به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر سطوح فسفر قرار گرفت. بیشترین وزن خشک ریشه از سطح ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر با متوسط ۵/۶۹ گرم به دست آمد. عدم استفاده از فسفر باعث کاهش معنی‌دار این شاخص به میزان ۴۲/۲۷ درصد نسبت به تیمار ۲۰ میلی‌گرم فسفر شد. استفاده از ۱۰ میلی‌گرم فسفر وزن خشک ریشه را به میزان ۱۶/۳ درصد نسبت به شاهد بدون فسفر افزایش داد.

استفاده از ۷۵ و ۱۵۰ گرم میکوریزا وزن خشک ریشه را به ترتیب ۴/۵ و ۱۳/۲ درصد نسبت به تیمار بدون میکوریزا افزایش داد. اثر ساده تنش خشکی بر وزن تر و خشک اندام هوایی نیز حاکی از تأثیر منفی و معنی‌دار تنش بر این دو شاخص بود. کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی در اثر تنش‌های متوسط و شدید به ترتیب ۳۱/۸ و ۴۷/۵ درصد نسبت به شاهد آبیاری نرمال بود.

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس وزن تر و خشک اندام هوایی به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر سطوح فسفر قرار گرفت. بیشترین وزن خشک اندام هوایی از سطح ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر با متوسط ۲۰/۴۷ گرم به دست آمد. عدم استفاده از فسفر باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی ۲۷/۹ درصد نسبت به تیمار ۲۰ میلی‌گرم فسفر شد. استفاده از ۱۰ میلی‌گرم فسفر وزن خشک اندام هوایی را ۱۰/۲ درصد نسبت به شاهد بدون فسفر افزایش داد. همچنین استفاده از ۷۵ و ۱۵۰ گرم میکوریزا و وزن خشک ریشه را به ترتیب ۸/۹ و ۴/۸ درصد نسبت به تیمار بدون میکوریزا افزایش داد.



طبق نتایج تجزیه واریانس برهم‌کنش سه‌گانه عوامل موردبررسی بر وزن خشک ریشه و اندام هوایی معنی‌دار بود. بررسی وزن خشک ریشه نشان داد بیشترین وزن خشک ریشه متعلق به برهم‌کنش سطح ۱۵۰ گرم میکوریزا، ۲۰ گرم فسفر در شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۱۸/۵۶ گرم بوده است. بیشترین خشک اندام هوایی به ترتیب با متوسط ۶/۱۳ گرم از همین تیمار به دست آمد که مستقلاً در بالاترین گروه آماری قرار گرفت (جدول ۱).

جدول ۱- اثر متقابل تنش خشکی، فسفر و میکوریزا بر خشک ریشه و اندام هوایی

میکوریزا (gr)	تنش خشکی	فسفر (mg/kg)	ریشه وزن خشک (gr)	اندام هوایی وزن خشک (gr)
صفر	نرمال	شاهد	g	def
		(صفر)	۸.۱۷	۴.۶۱
		۱۰	۱۰.۶۳ e	۴.۸۶ cd
	متوسط	۲۰	۱۳.۱۴ c	۵.۶۳ b
		شاهد	j	hij
		(صفر)	۶.۶۴	۳.۰۷
۷۵	نرمال	۱۰	۶.۸۵ ij	۳.۲۱ hi
		۲۰	۷.۰۶ i	۳.۸۵ g
	متوسط	شاهد	n	m
		(صفر)	۴.۹۶	۲.۴۲
		۱۰	۵.۷۴ kl	۲.۶۶ klm
		۲۰	۵.۹۵ kl	۲.۹۲ ijk
۱۵۰	نرمال	شاهد	g	de
		(صفر)	۸.۲۳	۴.۷
		۱۰	۱۰.۷۴ e	۵.۰۸ c
	متوسط	۲۰	۱۵.۶۲ b	۶.۰۳ a
		شاهد	ij	hij
		(صفر)	۶.۶۷	۳.۱۲
		۱۰	۶.۹۴ ij	۳.۳۳ h



۴.۳۵ f	۷.۰۷ i	۲۰		
m	mn	شاهد		
۲.۴۶	۵.۲۹	(صفر)	شدید	
۲.۸۲ jkl	۵.۷۷ kl	۱۰		
۲.۹۶ ijk	۵.۹۸ kl	۲۰		
de	f	شاهد		
۴.۷۳	۹.۰۲	(صفر)	نرمال	
۵.۵ b	۱۱.۷۴ d	۱۰		
۶.۱۳ a	۱۸.۵۶ a	۲۰		
hi	ij	شاهد		
۳.۱۴	۶.۷	(صفر)	متوسط	۱۵۰
۳.۶۲ g	۷.۰۴ ij	۱۰		
۴.۵۲ ef	۷.۷۳ h	۲۰		
lm	lm	شاهد		
۲.۶	۵.۵۹	(صفر)	شدید	
۲.۹۱ ijk	۵.۸۴ kl	۱۰		
۳.۰۵ hij	۶.۰۶ k	۲۰		

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون اختلاف معنی‌دار آماری ندارند (دانکن ۵٪)

غلظت فسفر اندام‌های هوایی

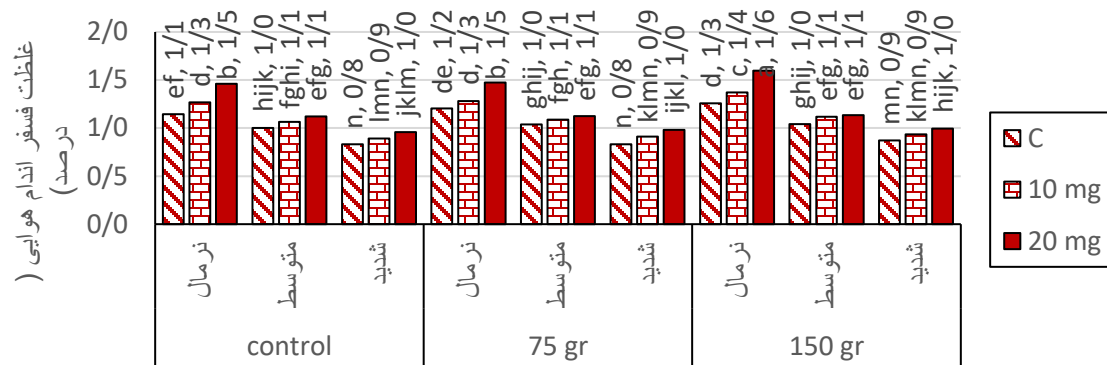
متوسط غلظت فسفر تحت تأثیر عوامل موردبررسی در اندام‌های هوایی در برهم‌کنش آبیاری نرمال، ۱۵۰ گرم میکوریزا و ۲۰ میلی گرم فسفر، ۱/۶ درصد بود.

در شرایط تنش حداکثر، افزایش سطح فسفر و میکوریزا در هریک از سطوح نتوانست غلظت فسفر اندام هوایی را به‌طور معنی‌دار افزایش دهد. بیشترین تغییرات غلظت فسفر اندام هوایی در اثر افزایش سطح میکوریزا و فسفر در شرایط حداقل تنش صورت گرفت (شکل ۵).



مطالعات مهندسی کشاورزی زراعت و اصلاح نباتات

7th International Conference on
Studies of Agricultural Engineering
Farming and Plant Breeding



شکل ۵- اثر متقابل تنش خشکی، فسفر و میکوریزا بر میانگین غلظت فسفر در اندام هوایی میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌دار آماری ندارند (دانکن ۵٪)

وابستگی میکوریزایی

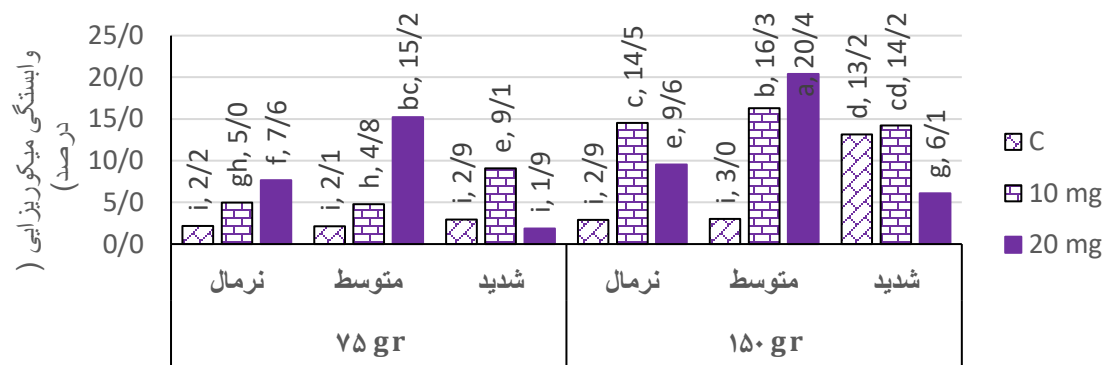
نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان‌دهنده اثر معنی‌دار کلیه عوامل مورد بررسی و اثر متقابل دو و سه‌گانه آن‌ها بر وابستگی میکوریزایی گیاه باقلا می‌باشد در شرایط تنش متوسط حداکثر میزان وابستگی میکوریزایی در گیاه باقلا مشاهده شد (۱۰/۳۱ درصد). وابستگی میکوریزایی در شرایط تنش شدید و آبیاری نرمال بدون اختلاف معنی‌دار و با کاهش به ترتیب با ۳۲/۴ و ۲۳/۳ درصد در گروه بعدی آماری قرار گرفتند. افزایش فسفر وابستگی میکوریزایی را به‌طور معنی‌دار نسبت به شاهد افزایش داد. این افزایش در سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم به ترتیب ۲/۴ و ۲/۳ برابر شاهد بدون فسفر بود. وابستگی میکوریزایی در سطوح ۷۵ و ۱۵۰ به ترتیب ۵/۶ و ۱۱/۱۳ درصد اندازه‌گیری شد که با اختلاف معنی‌دار در گروه‌ها مستقل آماری قرار گرفتند.

بیشترین وابستگی میکوریزایی از برهم‌کنش ۲۰ میلی‌گرم فسفر در شرایط تنش متوسط به دست آمد (۱۷/۸۱ درصد). نتایج به‌دست‌آمده حاکی از کمترین وابستگی در شرایط شاهد بدون فسفر در شرایط آبیاری نرمال و متوسط بود. کاهش وابستگی میکوریزایی در شرایط تنش با افزایش سطح فسفر مطابق نتایج گزارش شده توسط سابرمانیان و همکاران (۲۰۰۸) می‌باشد. افزایش سطح میکوریزا وابستگی میکوریزایی را افزایش داد. سطح ۱۵۰ گرم نسبت به ۷۵ گرم میکوریزا برای غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ گرم فسفر به ترتیب افزایش ۲/۴، ۲/۶ و ۱/۴ برابری داشت. بیشترین وابستگی میکوریزایی از برهم‌کنش سطح ۱۰ میلی‌گرم فسفر و ۱۵۰ گرم میکوریزا با متوسط ۱۵/۰۱ درصد به دست آمد.

در هر سطح تنش با افزایش میکوریزا وابستگی میکوریزایی افزایش یافت نتایج نشان داد رشد وابستگی میکوریزایی در شرایط تنش حداکثر نسبت به سایر سطوح تنش بیشتر بوده است افزایش وابستگی میکوریزایی در سطح ۱۵۰ گرم میکوریزا نسبت به سطح ۷۵ گرم همین عامل به ترتیب برای آبیاری نرمال، تنش متوسط و شدید ۱/۸۲، ۱/۷۹ و ۲/۴ برابر بود



تأثیر برهمکنش سه گانه عوامل مورد بررسی بر وابستگی میکوریزایی حاکی از بیشترین میزان این وابستگی در برهمکنش سطوح تنش شدید، ۲۰ میلی گرم فسفر و ۱۵۰ گرم میکوریزا بوده است. در این بررسی کمترین میزان وابستگی میکوریزایی از استفاده از ۷۵ گرم میکوریزا و ۲۰ میلی گرم فسفر در شرایط تنش شدید به دست آمد (شکل ۶)



شکل ۶- اثر متقابل تنش خشکی، فسفر و میکوریزا بر وابستگی میکوریزایی
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌دار آماری ندارند (دانکن %۵)

بحث و نتیجه گیری

در سطح تنش حداکثر، تعداد برگ، ارتفاع ساقه، تعداد میان گره، سطح برگ و شاخص کلروفیل به ترتیب ۵/۸، ۳/۳۶، ۵/۴۰ و ۴/۴۰ درصد نسبت به شرایط نرمال کاهش یافت. بر اساس این نتایج، بیشترین شاخص تأثیرپذیر از تنش، تعداد برگ در گیاه بود. از آنجا که برگ‌ها به عنوان اندام‌های اصلی فتوسنتز، نقش حیاتی در بقای گیاه داشتند، در شرایط تنش، گیاه با کاهش تعداد برگ‌ها تلاش کرد تا از هدر رفتن آب و مواد مغذی جلوگیری کند. بر اساس نتایج به دست آمده، برگ‌ها نسبت به سایر اندام‌های گیاه، حساسیت بیشتری به تنش داشتند. در شرایط تنش، برگ‌ها زودتر از سایر اندام‌ها دچار آسیب شدند.

تنش خشکی در گیاهان با قلا منجر به کاهش تعداد برگ از طریق پیری برگ، کاهش کارایی فتوسنتزی و تغییرات در مورفولوژی برگ شد. گیاه در مواجهه با کمبود آب، برگ‌های مسن‌تر را پیر کرده و مواد مغذی آن‌ها را بازجذب کرد تا منابع را برای برگ‌های جوان‌تر و تولید مثل حفظ کند. این فرآیند با تجزیه کلروفیل و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن تسریع شده و منجر به از دست دادن برگ گردید (Alegre, 2004 & Munné-Bosch).

با وجود نقش مهم فسفر در افزایش ارتفاع گیاهان با قلا تحت تنش خشکی، نتایج این آزمایش نشان داد که سطوح فسفر مورد استفاده نتوانست کاهش ارتفاع ناشی از تنش خشکی را به طور کامل جبران کند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که کاربرد فسفر می‌تواند اثرات منفی کمبود آب را کاهش داده و رشد و توسعه گیاه را بهبود بخشد. به عنوان مثال، بررسی‌های Mataa و همکاران (۲۰۱۹) بهبود قابل توجهی در ارتفاع گیاه لوبیا در شرایط خشکسالی با کاربرد فسفر نشان داد. همچنین، ژنوتیپ‌های لوبیا با دریافت فسفر کافی، رشد سریع‌تری داشته و دوره رسیدگی آن‌ها در شرایط تنش خشکی کاهش یافته است (Namugwanya et al., 2018). که به حفظ ارتفاع آن‌ها کمک کرده است.



بر اساس نتایج این آزمایش، افزایش تنش خشکی منجر به کاهش ارتفاع بوته باقلا شده و تلقیح با میکوریزا نتوانست این کاهش را به طور معنادار جبران کند، به ویژه در شرایط تنش شدید که تاثیر میکوریزا بر ارتفاع بوته نسبت به شاهد غیرمعنی دار بود. این در حالی است که مطالعات دیگر نشان می‌دهند میکوریزا به دلیل افزایش جذب مواد مغذی و آب و بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیکی، می‌تواند به افزایش ارتفاع گیاهان لوبیا حتی در شرایط تنش خشکی کمک کند (Zaman *et al.*, 2024). همچنین، گیاهان تلقیح شده با میکوریزا آربوسکولار، روابط آب برگ و هدایت آوندی بهتری داشتند که برای حفظ ارتفاع گیاه در طول تنش خشکی حیاتی است (Williams, 2021 & Al-Karaki).

تنش خشکی به طور قابل توجهی میزان کلروفیل برگ گیاهان را کاهش داد. این کاهش در ذرت در سلول‌های مزوفیل بیشتر از سلول‌های غلاف آوندی بود و عمدتاً به دلیل کاهش پروتئین کلروفیل a/b رخ داد (Mobasser, 2014 & Arabshahi). با این حال، افزایش سطح فسفر نتوانست اثرات منفی تنش خشکی را تعدیل کرده و منجر به افزایش تعداد برگ، ارتفاع ساقه، سطح برگ و شاخص کلروفیل شود. بیشترین تاثیر افزایش فسفر در این مطالعه بر تعداد برگ مشاهده شد که نشان‌دهنده اهمیت این عنصر در تولید برگ‌های جدید و توسعه سیستم رویشی گیاه و در نتیجه افزایش سطح فتوسنتز کننده است. فسفر نقش حیاتی در تقسیم سلولی و رشد بافت‌های جدید داشت.

فسفر با ارتقای رشد رویشی و توسعه سطح برگ، تعداد برگ را به‌طور قابل توجهی افزایش داد. فسفر برای فرآیندهای متابولیک مختلف، از جمله فتوسنتز و انتقال انرژی بسیار مهم بود که به‌طور مستقیم بر گسترش برگ و سلامت کلی گیاه تاثیر می‌گذاشت. بر اساس نتایج Lynch و همکاران (۱۹۹۱)، تأمین کافی فسفر برای رشد برگ ضروری است، زیرا بر تعداد برگ‌ها و گره‌ها تأثیر می‌گذارد و در نتیجه میزان شاخه و ظاهر برگ را افزایش می‌دهد.

کمبود فسفر از طریق مکانیسم‌های متعدد باعث کاهش قابل توجه سطح برگ در گیاهان شد. سرعت انبساط برگ و اندازه نهایی برگ را به‌ویژه در برگ‌های پایین کاهش داد (Colomb *et al.*, 2000). کاهش سطح برگ در درجه اول به دلیل نرخ تولید سلولی کمتر و کاهش طول نهایی سلول بود. کمبود فسفر فرآیندهای تقسیم سلولی و طولی شدن را کند کرده و منجر به کوچک‌تر شدن برگ‌ها شد (Kavanová *et al.*, 2006).

استفاده از قارچ‌های میکوریزا باعث افزایش شاخص‌های مورفولوژیک و شاخص کلروفیل گیاه شد. افزایش شاخص‌های اندازه‌گیری شده در بالاترین سطح میکوریزا نسبت به شاهد بدون آن به ترتیب برای تعداد برگ (۱۲/۳ درصد)، ارتفاع ساقه (۴/۹۷ درصد)، سطح برگ (۵/۷ درصد) و شاخص کلروفیل (۹/۵ درصد) بود. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، بیشترین شاخص تحت تاثیر میکوریزا تعداد برگ بود. قارچ‌های میکوریزا با افزایش جذب فسفر که نقش مهمی در تقسیم سلولی و رشد بافت‌های جدید داشت، منجر به تولید برگ‌های بیشتر شدند و همچنین با بهبود جذب آب و مواد مغذی، باعث افزایش رشد سیستم رویشی گیاه و در نتیجه تولید برگ‌های بیشتر شدند.

افزایش تعداد برگ در گیاهان تلقیح شده با میکوریزا ناشی از بهبود رشد و جذب مواد مغذی بود. این قارچ‌ها با ایجاد همزیستی با ریشه، جذب مواد غذایی (Thangavel, 2022 & Selvaraj)، روابط آبی (Lü *et al.*, 2018) و بازده فتوسنتزی (Ballhorn & Millar, 2013) را افزایش داده و به طور مستقیم به رشد برگ کمک کردند.

اگرچه در این آزمایش استفاده از میکوریزا نتوانست اختلاف معناداری در ارتفاع بوته نسبت به شاهد ایجاد کند، اما تلقیح میکوریزایی به طور کلی رشد گیاه و جذب مواد مغذی در حبوبات، به ویژه باقلا (*Vicia faba* L.) را افزایش می‌دهد. مطالعات دیگر نشان



داده‌اند که تیمار با میکوریزا می‌تواند ارتفاع گیاه باقلا را به طور قابل توجهی افزایش دهد (Aldeen and Sultan, 2019)، که این افزایش رشد به بهبود جذب مواد مغذی مانند فسفر، نیتروژن و پتاسیم نسبت داده می‌شود (Dubova et al., 2015).

افزایش سطح تنش خشکی در این آزمایش منجر به کاهش ۴۷/۵ درصدی وزن خشک اندام هوایی و ۵۱/۶ درصدی وزن خشک ریشه گیاه باقلا شد که نشان‌دهنده کاهش آب و مواد آلی در بافت‌ها و کاهش رشد ریشه است. تنش خشکی با اختلال در فتوسنتز، جذب و انتقال مواد مغذی و افزایش تنفس و تجمع ترکیبات مضر، وزن خشک و رشد کلی گیاه را کاهش داد (Siddiqui et al., 2015; Abid et al., 2017). با این حال، برخی ژنوتیپ‌ها مکانیسم‌های تحمل به خشکی نشان دادند (Abid et al., 2017).

از سوی دیگر، قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار با ایجاد همزیستی مفید با ریشه باقلا، زیست‌توده و جذب مواد مغذی، به ویژه در شرایط کمبود مواد غذایی را افزایش می‌دهند (Almethyeb et al., 2013). این قارچ‌ها جذب فسفر، آهن و روی را بهبود بخشیده، زیست‌توده و تراکم ریشه را افزایش داده و تثبیت نیتروژن را تقویت می‌کنند (Ingraffia et al., 2019). تلقیح با میکوریزا ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ و عملکرد دانه را در باقلا افزایش داده و با بهبود فتوسنتز و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، تحمل به خشکی و اصلاح خاک را تقویت می‌کند (Gholamhoseini et al., 2022). اثرات مثبت میکوریزا در خاک‌های فقیر از مواد مغذی بارزتر است (Almethyeb et al., 2013) و پتانسیل آن در کشاورزی پایدار و افزایش بهره‌وری محصول را نشان می‌دهد.

تنش خشکی باعث کاهش جذب و انتقال فسفر در گیاه شد. کاهش فسفر، ۲۰ درصد نسبت به شاهد بدون تنش بود. کاهش درصد این عنصر نشان‌دهنده اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاه در شرایط تنش است. تنش خشکی باعث کاهش رطوبت خاک شد و در نتیجه، حرکت و جذب مواد مغذی توسط ریشه گیاه را محدود کرد. این تنش باعث کاهش رشد ریشه و در نتیجه کاهش سطح جذب مواد مغذی شد.

قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار باعث افزایش جذب فسفر در گیاه و مقاومت به خشکی شدند. در شرایط تنش آبی، در گیاهان تلقیح شده با قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار ویژگی‌های رشد بهبود یافته و جذب مواد مغذی افزایش یافت. در شرایط تنش متوسط، حداکثر میزان وابستگی میکوریزایی در گیاه باقلا مشاهده شد (۱۰/۳۱ درصد). وابستگی میکوریزایی در شرایط تنش شدید و آبیاری نرمال نسبت به این تیمار به ترتیب ۳۲/۴ و ۲۳/۳ درصد کاهش یافت. افزایش فسفر وابستگی میکوریزایی را نسبت به شاهد افزایش داد. این افزایش در سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم به ترتیب ۲/۴ و ۲/۳ برابر شاهد بدون فسفر بود. وابستگی میکوریزایی در سطوح ۷۵ و ۱۵۰ میکوریزا به ترتیب ۵/۶ و ۱۱/۱۳ درصد اندازه‌گیری شد.

اثر متقابل تنش خشکی و میکوریزا به طور قابل توجهی بر وزن خشک اندام هوایی لوبیا تاثیر داشت، به طوری که میکوریزا آربوسکولار با افزایش رشد و انعطاف‌پذیری گیاه تحت خشکی، زیست‌توده هوایی را افزایش داده و جذب مواد مغذی و پاسخ‌های فیزیولوژیکی را بهبود می‌بخشد (Recchia et al., 2018). گیاهان تلقیح شده با میکوریزا آربوسکولار تحت تنش خشکی ۵۴٪ افزایش وزن خشک شاخه نشان دادند و ترکیبات خاص میکوریزایی جذب زیست‌توده و مواد مغذی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند. میکوریزا با بهبود کلروفیل، رسانایی روزنه‌ای و ترشح گلوکز، مزایای فیزیولوژیکی و تغذیه‌ای ایجاد کرده و با تنظیم ژن‌های مرتبط با خشکی، سازگاری گیاه با تنش آبی را افزایش می‌دهد. با این حال، تنش خشکی شدید می‌تواند بر مزایای میکوریزا غلبه کند (Chandrasekaran, 2022).

میکوریزا آربوسکولار نقش مهمی در افزایش جذب مواد مغذی و مقاومت به خشکی دارد. گیاهان تلقیح شده تحت تنش آبی، رشد بهبود یافته و جذب N، P و K بیشتری نشان می‌دهند (وو و زو، ۲۰۰۹). گیاهان تلقیح شده با میکوریزا آربوسکولار تحت تنش



خشکی ۴۹٪ افزایش رشد، افزایش زیست‌توده، بهبود مورفولوژی ریشه و افزایش جذب مواد مغذی، به ویژه ۸۶٪ افزایش جذب فسفر را نشان می‌دهند (Chandrasekaran, 2022). این همزیستی تحمل به خشکی را از طریق افزایش جذب مواد مغذی، به ویژه فسفر، و تغییرات ریشه بهبود می‌بخشد و به کشاورزی پایدار در مناطق کم‌آب کمک می‌کند.

منابع

1. Abid, G. Hessini, K. Aouida, M. Aroua, I., & Jebara, M. (2017). Agro-physiological and biochemical responses of faba bean (*Vicia faba* L. var. 'minor') genotypes to water deficit stress. BASE [En ligne], Volume 21 (2017), Numéro 2, 146-159. URL: <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=13579>.
2. AjemaGebisa, L. (2024). Associations of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) for Enhancements in Soil Fertility and Promotion of Plant Growth: A Review. Advances in Bioscience and Bioengineering, 12(4), 72-80. <https://doi.org/10.11648/j.abb.20241204.11>
3. Aldeen, H.S., & Sultan, M.Y. (2019). Influence of bio-fertilizers (Rhizobia mycorrhizae) and phosphorus on nodulation and some growth characteristics of broad bean (*Vicia faba* L.). *mesopotamia journal of agriculture*.
4. Al-Karaki, G. N., & Williams, M. A. (2021). Mycorrhizal mixtures affect the growth, nutrition, and physiological responses of soybean to water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43(5), 1-9. <https://doi.org/10.1007/S11738-021-03250-0>
5. Arabshahi, M., & Mobasser, H.R. (2017). Effect of drought stress on carotenoid and chlorophyll contents and osmolyte accumulation.
6. Ardakani, M.R., Maleki, S., Aghayri, F., Rejali, F., & Faregh, A.H. (2014). Tripartite symbiosis of Lentil (*Lense culinaris* L.), Mycorrhiza and Azospirillum brasilense under Rainfed Condition. Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference. 'Building Organic Bridges, at the Organic World Congress 2014, 13-15 Oct., Istanbul, Turkey (eprint ID 24212)
7. Ballhorn, D. J., & Millar, J. A. (2013). Effect of Mycorrhizal Colonization and Light Limitation on Growth and Reproduction of Lima Bean (*Phaseolus lunatus* L.). *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 86(1), 172-179. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2013.086.023>
8. Beltayef, H., Saidi, W., Hajri, R., Mechri, M., Melki, M. 2023. Mycorrhizal fungi inoculation effect on plant growth and phosphorus metabolism of snap bean variety "Contender". GSC



Advanced Research and Reviews, doi: 10.30574/gscarr. 2023.15.3.0156

9.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(7), 660. <https://doi.org/10.3390/jof8070660>

10.Colomb, B., Kiniry, J. R., & Debaeke, P. (2000). Effect of Soil Phosphorus on Leaf Development and Senescence Dynamics of Field-Grown Maize. Agronomy Journal, 92(3), 428-435. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.923428x>

11.Dubova, L., Šenberga, A., & Alsina, I. (2015). the effect of double inoculation on the broad beans (*Vicia faba* L.) yield quality.

12.Jin, Z.; Wang, G.; George, T.S.; Zhang, L. Potential Role of Sugars in the Hyphosphere of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Enhance Organic Phosphorus Mobilization. J. Fungi 2024, 10, 226. <https://doi.org/10.3390/jof10030226>

13. Lynch, J. P., Läuchli, A., & Epstein, E. (1991). Vegetative Growth of the Common Bean in Response to Phosphorus Nutrition. Crop Science, 31(2), 380–387. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI1991.0011183X003100020031X>

14.Martin, F., Uroz, S., and Barker, D. 2017. Ancestral alliances: Plant mutualistic symbioses with fungi and bacteria. Science. <https://doi.org/10.1126/science.aad4501>

15.Mataa, M., Mphande, K., & Munyinda, K. (2019). Interactive effects of phosphorus and water stress on plant development and yield resilience in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). African Journal of Agricultural Research, 14(22), 949–962. <https://doi.org/10.5897/AJAR2019.14069>

16.Munné-Bosch, S., & Alegre, L. (2004). Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. Functional Plant Biology, 31(3), 203–216. <https://doi.org/10.1071/FP03236>

17.Namugwanya, M., Tenywa, J. S., & Otabbong, E. (2018). Response of Common Bean Genotypes Grown in Soil with Normal or Limited Moisture, with Special Reference to the Nutrient Phosphorus. Agronomy, 8(8), 132. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY8080132>

18.Rai,M.2006.HandbookofMicrobialBiofertilizers.<https://doi.org/10.1201/9781482277760>