فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۳، شماره ۶۰، خرداد و تیرماه ۱۴۰۳ صفحه: ۹۳-۱۰۶
https://doi.org/10.22034/13.60.93

مقاله پژوهشی

# واکنش بیوشیمیایی ارقام سورگوم دانه‌ای به رژیم آبیاری و میکوریزا

صادق آزادبخت[۱]، مسعود رفیعی*[۲]، علی خورگامی[۱]

[۱] گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

[۲] بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷)

## چکیده

**کم‌آبیاری یکی از راه‌های کاهش مصرف آب در گیاهان زراعی گرمادوست و آب‌بر است. از طرف دیگر، کاربرد میکوریزا به‌عنوان کود زیستی نیز از جمله راه‌کارهای مؤثر در افزایش جذب آب و عناصر غذایی در شرایط تنش کم‌آبی است. علاوه‌براین، انتخاب رقم سازگار با منطقه جهت دست‌یابی به پتانسیل تولید، یکی دیگر از راه‌کارهای مقابله با تنش خشکی در هر منطقه است. بدین منظور اثر رژیم آبیاری در سه سطح ۸۰ (شاهد)، ۱۲۰ (تنش ملایم) و ۱۶۰ (تنش شدید) میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس الف و کود زیستی شامل کاربرد و عدم کاربرد میکوریزا روی سه رقم سورگوم دانه‌ای کیمیا، پیام و سپیده در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی به‌صورت اسپلیت پلات در کشت تابستانه سال ۱۳۹۶ در شهرستان کوهدشت لرستان بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش کم‌آبیاری از میزان روی، مس، منگنز و آهن دانه کاسته شد، اما میزان پروتئین خام دانه افزایش یافت. کاربرد میکوریزا عمدتاً موجب افزایش عناصر ضروری در اندام هوایی و دانه و کمک به تعدیل تنش کم‌آبی شد. وجود برهمکنش میان عامل‌ها، حاکی از واکنش متفاوت ارقام در سطوح کاربرد میکوریزا به تنش کم‌آبی از نظر بسیاری از صفات بود؛ به‌طوری‌که در شرایط تنش شدید کم‌آبی، بیشترین افزایش در کاتالاز و پراکسداز به‌ترتیب در رقم کیمیا بدون کاربرد میکوریزا و رقم سپیده با کاربرد میکوریزا مشاهده شد. همچنین، رقم سپیده با کاربرد میکوریزا بیشترین کاهش در کلروفیل b و کلروفیل کل را نشان دادند. در مجموع رقم سپیده با کاربرد میکوریزا در شرایط تنش ملایم کم‌آبی ضمن تولید بیشترین عملکرد دانه و پروتئین خام دانه، موجب صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری شد.**

**واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، عملکرد دانه، دور آبیاری، عناصر ریزمغذی، پروتئین**

## مقدمه

تنش خشکی را می‌توان به‌صورت فقدان آب کافی مورد نیاز برای رشد طبیعی و تکمیل چرخه زندگی گیاه تعریف نمود (Jabereldar *et al.*, 2017). مدل‌های تغییرات آب و هوایی، تغییر زیادی در الگوی بارش توأم با افزایش طول دوره تابستان خشک پیش‌بینی می‌نمایند که بر بسیاری از مناطق از جمله ایران مؤثر است (IPCC, 2019). گیاهان متحمل به خشکی، مانند سورگوم، نیازمند به کارگیری مدیریت بهتر زراعی در شرایط تغییرات آب و هوایی هستند (Menezes *et al.*, 2015).

سورگوم پنجمین غله مهم در جهان است و جز غذای اصلی بیش از ۵۰۰ میلیون نفر در بیش از ۳۰ کشور است و

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

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

چهارمین دانه غذایی در جهان محسوب می‌شود (Ahmed *et al.*, 2016). در بررسی معیارهای مؤثر در تحمل ده ژنوتیپ سورگوم به تنش خشکی در مرحله گیاهچه‌ای و بعد از مرحله گل‌دهی معلوم شد که بین ژنوتیپ‌ها از نظر همه صفات مورفوفیزیولوژیک مورد بررسی مانند وزن خشک ریشه، طول ریشه، طول کلئوپتیل، نسبت ریشه به ساقه، سطح برگ پرچم، شاخص سطح و وزن برگ پرچم، ماده خشک برگ، محتوی نسبی آب، پایداری غشاء سلولی و عملکرد دانه در هر بوته تفاوت معنی‌داری وجود داشت (Amjad Ali *et al.*, 2009). در تحقیق دیگری روی سورگوم مشاهده شد که تنش خشکی در مرحله رشد زایشی تا ۵۰ درصد عملکرد دانه را کاهش داد، اما بروز تنش در مرحله رشد رویشی ۳۰ درصد عملکرد را پایین آورد (Amjad Ali *et al.*, 2009). به‌طورکلی، تنش خشکی بسته به شدت، زمان، طول مدت و ارتباط آن با دیگر عوامل تأثیر متفاوتی بر رشد و عملکرد سورگوم دارد (Assefa *et al.*, 2010). بر این اساس، ژنوتیپ‌های سورگوم بطور معنی‌داری از نظر واکنش به تنش خشکی و تحمل خشکی متفاوت‌اند و درجه تحمل به تنش آنها به برهمکنش میان ژنوتیپ و سطح تنش خشکی بستگی دارد (Jabereldar *et al.*, 2017).

بسیاری از پژوهشگران به نقش مثبت کودهای زیستی حاوی قارچ‌های میکوریزا آربسکولار بر خصوصیات کمی، کیفی، رشد و عملکرد گیاهان زراعی اشاره کرده‌اند که از طریق توسعه سیستم ریشه‌ای، بهبود جذب و انتقال عناصر غذایی، تولید متابولیت‌ها، هورمون‌های گیاهی، امکان افزایش رشد و عملکرد گیاهان زراعی را فراهم می‌کنند (Benabdellah *et al.*, 2011; Latef and Chaoxing, 2010). افزایش قابلیت دسترسی به عناصر غذایی به ویژه فسفر برای گیاهان (قنبری و همکاران، ۱۴۰۰)، افزایش فتوسنتز (Valentine *et al.*, 2006)، افزایش غلظت هورمون‌های گیاهی و محتوای کلروفیل (Smith and Read, 2008)، تسریع در گلدهی گیاهان میزبان، افزایش مقاومت به تنش خشکی و تنش شوری، ایجاد واکنش‌های مورفولوژیک در گیاهان (Varma, 2008) مهم‌ترین نقش قارچ‌های میکوریزا در نظام زراعتی بیان شده است.

به‌کارگیری قارچ‌های میکوریزا آربسکولار در کشت مزرعه‌ای ذرت توانست ارتفاع بوته، طول بلال، جذب پتاسیم، نیتروژن و فسفر و همچنین درصد کلونیزاسیون ریشه را در سطح معنی‌داری افزایش دهد (امیرآبادی و همکاران، ۱۳۸۹). کاربرد قارچ میکوریزا به دلیل افزایش جذب آب، مواد غذایی و انتقال بهتر این مواد در اندام گیاهی و همچنین افزایش کارایی فتوسنتز گیاه، باعث افزایش شاخص‌های مورفولوژی و زراعی گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) شد (Hamzeie *et al.*, 2014). گزارش شده است که همزیستی میکوریزایی می‌تواند از طریق توسعه سیستم ریشه‌ای و افزایش جذب عناصر غذایی، سبب بهبود غلظت عناصر در اندام‌های هوایی گیاهان گردد (Parsa-Motlagh *et al.*, 2011).

با توجه به موارد ذکرشده، هدف از اجرای این آزمایش بررسی تأثیر کاربرد میکوریزا در کاهش اثرهای تنش کم‌آبی بر عملکرد، جذب عناصر و خصوصیات بیوشیمیایی سه رقم سورگوم دانه‌ای در شرایط آب و هوایی معتدل کوهدشت لرستان بود.

## مواد و روش‌ها

این آزمایش در تابستان سال ۱۳۹۶ در شهرستان کوهدشت با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا اجرا شد که طبق تقسیم‌بندی اقلیمی این منطقه دارای اقلیم نیمه‌گرمسیری با تابستان گرم و خشک است.

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی به‌صورت اسپلیت پلات – فاکتوریل با چهار تکرار اجرا شد. سه رژیم آبیاری شامل آبیاری پس از ۸۰ (شاهد)، ۱۲۰ (تنش ملایم) و ۱۶۰ (تنش شدید) و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر کلاس الف (نجفی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸) سطوح فاکتور اصلی و دو سطح کاربرد و عدم کاربرد کود زیستی میکوریزا و سه رقم سورگوم دانه‌ای شامل کیمیا، پیام و سپیده سطوح فاکتورهای فرعی را تشکیل دادند.

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

**جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه**

| نیتروژن (درصد) | فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | هدایت الکتریکی (میلی‌موس بر سانتی‌متر) | pH | کربن آلی | آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | بافت خاک |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۰/۳۸ | ۹/۲ | ۲۸۵ | ۱/۲۵ | ۷/۴ | ۰/۹۵ | ۱۱/۳ | ۷/۱ | ۰/۳۰ | ۰/۹۲ | لومی |

زمین قبل از اجرای آزمایش طی هر دو سال گندم بود. خصوصیات خاک مزرعه (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر) در جدول ۱ ارائه شده است. بافت خاک مزرعه لومی بود. براساس نتایج آزمون خاک نیمی از کود شیمیایی نیتروژن، و تمام فسفر و پتاسیم خالص براساس آزمون خاک به ترتیب ۱۲۰، ۶۰ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار و از منبع اوره، سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم در زمان کاشت تأمین گردید. در کرت‌هایی که از قارچ مایکوریزا استفاده شد، ۲۵ درصد میزان توصیه‌شده کود فسفره استفاده شد. نیم دیگر کود اوره به صورت سرک در مرحله ۶-۴ برگی مصرف شد. فاصله ردیف‌های کاشت ۵۰ سانتی‌متر و هر کرت مشتمل بر پنج خط کاشت به طول ۶ متر بود. فاصله تکرارها ۲/۵ متر، بین پلات‌های اصلی ۲ متر و بین پلات‌های فرعی یک خط نکاشت در نظر گرفته شد. کاشت هر سال در تاریخ ۷ تیرماه انجام و تراکم مورد استفاده ۲۰۰ هزار بوته در هکتار در نظر گرفته شد. مراقبت‌های زراعی شامل وجین بسته به نیاز در طول فصل رشد انجام گردید.

تیمارهای مختلف تنش کم‌آبی در مرحله ۶-۴ برگی، یعنی پس از استقرار کامل گیاه در مزرعه اعمال شد. مقدار آب آبیاری تکمیلی برای هر پلات اصلی براساس فرمول $VW = (FC - \theta) \times BD \times A \times D/Ea$ (علی‌زاده، ۱۳۹۰) محاسبه شد که در آن VW، حجم آب آبیاری (متر مکعب)؛ FC، درصد وزنی رطوبت خاک در حالت ظرفیت مزرعه (۲۸ درصد)؛ θ، درصد وزنی رطوبت خاک در زمان آبیاری؛ BD، وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه (۱/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب)؛ A، مساحت پلات اصلی آزمایش؛ D، عمق نفوذ ریشه در خاک در مرحله سنبله‌دهی (متر) و Ea، راندمان کاربرد آب آبیاری (۹۰ درصد) بود. پس از محاسبه مقدار آب لازم، کرت‌های اصلی با استفاده از پمپ آب که از دبی خروجی مشخص برخوردار بود تا رسیدن به حد ظرفیت مزرعه آبیاری می‌شدند. برای تعیین طول مدت (t) آبیاری هر پلات از رابطه $t = V/Q$ استفاده شد که در آن V، حجم آب آبیاری بر حسب لیتر و Q، دبی خروجی پمپ آب بر حسب لیتر در ثانیه بود. با توجه به محصور بودن کرت‌های آزمایشی هدررفت آب صفر بود. به منظور توزیع یکنواخت آب در هر پلات، ابتدا و انتهای کرت‌ها مسدود و برای تعیین درصد رطوبت خاک قبل از هر آبیاری، از دستگاه رطوبت‌سنج استفاده شد.

در مرحله گلدهی نمونه‌هایی از برگ‌های جوان گیاه از هر کرت جهت انجام تجزیه‌های بیوشیمیایی جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد و سنجش میزان کلروفیل (Arnon, 1967)، مقدار عناصر ضروری نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی (Ryan *et al.*, 2007)؛ آنزیم پراکسیداز (Mae-Adam and Nelson, 1992) و کاتالاز (Dhindsa *et al.*, 1981) و پرولین (Bates *et al.*, 1973) صورت گرفت. در زمان برداشت عملکرد دانه سه ردیف وسط هر کرت آزمایشی با رعایت یک‌چهارم متر حاشیه از طرفین اندازه‌گیری و بر اساس ۱۲ درصد رطوبت محاسبه شد. همچنین، نمونه‌هایی از دانه هر کرت جهت انجام تجزیه‌های بیوشیمیایی به آزمایشگاه منتقل و مقدار عناصر ضروری نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی (Ryan *et al.*, 2007) و مقدار پروتئین (Kjeldal, 1998) در دانه اندازه‌گیری شد. تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.1 صورت گرفت.

## نتایج و بحث

**رنگیزه‌های فتوسنتزی:** نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای ساده رژیم آبیاری، میکوریزا و رقم بر کلروفیل a،

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

**جدول ۲- تجزیه واریانس برخی صفات بیوشیمیایی اندام هوایی و دانه سورگوم**

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | کلروفیل a | کلروفیل b | کلروفیل کل | پراکسیداز اندام هوایی | کاتالاز اندام هوایی | مس اندام هوایی | مس دانه |
| تکرار | ۳ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۳ | ۰/۵۸ | ۰/۰۷۴۳۸۱ |
| تنش (A) | ۲ | ۰/۰۰۰۰۱۱ ** | ۰/۰۰۰۰۰۱۵** | ۰/۰۰۰۰۲۱** | ۰/۰۰۰۶** | ۰/۰۰۰۴** | ۱۲۳/۱۶** | ۰/۵۷** |
| خطای۱ | ۶ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۰۲ | ۳/۱۶ | ۰/۰۲۷۷۱۶ |
| میکوریزا (B) | ۱ | ۰/۰۰۰۰۰۳۹** | ۰/۰۰۰۰۰۱۴** | ۰/۰۰۰۰۱** | ۰/۰۰۰۰۰۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۶ | ۰/۸۸ | ۱/۵۶** |
| رقم (C) | ۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۴* | ۰/۰۰۰۰۰۰۷۷** | ۰/۰۰۰۰۰۲** | ۰/۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۱** | ۰/۰۴۱ | ۰/۲۳* |
| (B) × (A) | ۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۸۳** | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۰۰۱۴ | ۰/۰۰۰۰۵ | ۰/۰۰۰۰۷* | ۱۲/۰۵** | ۰/۰۸۱۷۷۹ |
| (C) × (A) | ۴ | ۰/۰۰۰۰۰۱۶۹* | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۰۰۱۹** | ۰/۰۰۰۳** | ۰/۰۰۰۷** | ۱/۵۲ | ۰/۰۷۷۱۶ |
| (C) × (B) | ۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۵۲* | ۰/۰۰۰۰۰۱۱** | ۰/۰۰۰۰۰۳۱** | ۰/۰۰۰۱** | ۰/۰۰۰۳** | ۳/۰۱ | ۰/۱۴۸۵۱۳ |
| (C)×(B)×(A) | ۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۱۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۹۳** | ۰/۰۰۰۰۰۱۴** | ۰/۰۰۰۴** | ۰/۰۰۰۵** | ۲/۷۴ | ۰/۱۷* |
| خطای۲ | ۴۵ | ۰/۰۰۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۳ | ۰/۰۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۰۲ | ۱/۶۲ | ۰/۰۶۲۲۷۱ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۱۰/۶۳ | ۱۱/۳ | ۸/۶۲ | ۰/۶۰۵ | ۱۱/۱۵۸ | ۱۰/۹۳۵ | ۱۱/۱۸ |

*** و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.**

**ادامه جدول ۲-**

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | آهن اندام هوایی | آهن دانه | منگنز اندام هوایی | منگنز دانه | روی اندام هوایی | روی دانه | پروتئین دانه |
| تکرار | ۳ | ۹۳/۹۸ | ۰/۰۷۷۳۱۳ | ۱۲۰/۱۹ | ۰/۱۱۰۳۳۱ | ۳۳/۴۴ | ۰/۱۱۴۶۲۷ | ۰/۰۴۵۹۹۸ |
| تنش (A) | ۲ | ۳۴۶۶۷/۹** | ۳/۵۱** | ۳۶۳۹۵/۹** | ۳/۷۸** | ۲۰۹۴/۲** | ۱/۵۳** | ۰/۶۸** |
| خطای۱ | ۶ | ۱۶۴/۶۸ | ۰/۰۶۸۳۲۴ | ۲۹۸/۸۳ | ۰/۰۵۳۰۲۸ | ۱۱۱/۸۷ | ۰۵۲۷۶۵ | ۰/۰۴۴۶۰۶ |
| میکوریزا (B) | ۱ | ۱۲/۵ | ۲/۳۰** | ۱۳۰/۶۸ | ۳/۹۱** | ۶/۷۲ | ۱/۱۸** | ۱/۴۳** |
| رقم (C) | ۲ | ۱۶۵/۴۳ | ۰/۱۵۱۰۶ | ۵۴/۷۶ | ۰/۰۶۶۶ | ۰/۷۲ | ۰/۰۳۶۹۸۵ | ۰/۳۳* |
| (B) × (A) | ۲ | ۱۲۰/۷۹ | ۰/۴۵** | ۸۹/۳۴ | ۰/۰۳۷۱۶۲۹ | ۵۷/۲۶ | ۰/۱۵۰۲۰۶ | ۰/۰۳۴۸۰۴ |
| (C) × (A) | ۴ | ۲۵۵/۳* | ۰/۰۹۲۱۶۶ | ۱۸۵/۴۹ | ۰/۰۴۶۳۹۲ | ۳۸/۵۵ | ۰/۰۱۳۸۰۱ | ۰/۰۷۶۲۹۱ |
| (C) × (B) | ۲ | ۴۳۶/۶* | ۱/۵۲** | ۸۲/۹۳ | ۰/۸۲** | ۳۱/۰۵ | ۰/۷۲** | ۰/۲۵۷۸۲۹ |
| (C)×(B)×(A) | ۴ | ۴۳۱/۱۶** | ۰/۱۲۷۴۴ | ۱۱۸/۴۰ | ۰/۱۱۸۳۹۶ | ۵/۵۹ | ۰/۰۸۹۸۱ | ۰/۱۶۹۴۴ |
| خطای۲ | ۴۵ | ۹۳/۶۵ | ۰/۰۸۷۵۶۱ | ۲۳۵/۴۶ | ۰/۱۳۸۴۳۵ | ۵۰/۲۸ | ۰/۱۳۹۱۳۸ | ۰/۰۸۵۷۲۲ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۴/۶ | ۱/۰۱۹ | ۱۵/۲۷ | ۲/۸۳ | ۱۵/۳۴ | ۲/۴۵۶ | ۲/۲۱۸۱ |

*** و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.**

کلروفیل b و کلروفیل کل معنی‌داری بود. کلروفیل a و کلروفیل کل به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرهای متقابل رژیم آبیاری در میکوریزا، رژیم آبیاری در رقم و میکوریزا در رقم قرار گرفتند. کلروفیل b نیز تحت تأثیر برهمکنش میکوریزا در رقم بود. همچنین، برهمکنش سه گانه رژیم آبیاری در میکوریزا در رقم بر کلروفیل b و کلروفیل کل معنی‌داری شد (جدول ۲).

مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی با تشدید تنش کم‌آبی کاهش

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

یافت. تنش متوسط و شدید کم‌آبی، کاهش به‌ترتیب ۱۸/۹ و ۳۷/۸ درصدی کلروفیل a، ۱۰/۱ و ۱۷/۹ درصدی کلروفیل b و ۱۵/۱ و ۲۹/۳ درصدی کلروفیل کل را به‌همراه داشت (جدول ۳). تنش کم‌آبی باعث تولید اکسیژن فعال همراه با کاهش و تجزیه کلروفیل می‌شود (کافی و رستمی، ۱۳۸۶). در میان ارقام بیشترین کلروفیل a از ارقام پیام و سپیده و کمترین آن از رقم کیمیا بدست آمد. بیشترین و کمترین مقدار کلروفیل b و کلروفیل کل از ارقام پیام و کیمیا حاصل شد. مقایسه میانگین اثر ساده میکوریزا نشان داد که افزایش ۱۴/۵، ۱۰/۴ و ۱۲/۷ درصدی در میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل ناشی از کاربرد میکوریزا مشاهده شد (جدول ۳).

مقایسه میانگین برهمکنش دو گانه عامل‌ها نشان داد که تنش شدید کم‌آبی و عدم کاربرد میکوریزا موجب کاهش ۴۵/۱ درصدی کلروفیل a نسبت به شرایط نرمال آبیاری و کاربرد میکوریزا شد (جدول ۴). کاربرد میکوریزا در رقم پیام سبب کاهش ۲۴/۳ درصدی کلروفیل a نسبت به شرایط عدم کاربرد میکوریزا در رقم کیمیا شد (جدول ۵). مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه عامل‌ها نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل b اندام هوایی از شرایط نرمال آبیاری و کاربرد میکوریزا در رقم پیام حاصل شد که در شرایط تنش شدید کم آبی و عدم کاربرد میکوریزا در رقم پیام با ۴۲/۹ درصد کاهش به کمترین میزان خود رسید (شکل ۱). شرایط تنش شدید کم آبی و عدم کاربرد میکوریزا در رقم پیام نیز موجب کاهش ۵۰/۹ درصدی میزان کلروفیل کل اندام هوایی در مقایسه با شرایط نرمال آبیاری و کاربرد میکوریزا در رقم سپیده شد (شکل ۱).

کلروفیل‌های a و b مهمترین رنگیزه فتوسنتزی است که در فتوسنتز به طور مستقیم نقش دارند و تحت تأثیر عوامل ژنوتیپ محیط قرار می‌گیرند. کاهش در مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی ناشی از تنش کم‌آبی پیش از این در سورگوم (عمادی و همکاران، ۱۴۰۱؛ قنبری و همکاران، ۱۴۰۰؛ نجفی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸) گزارش شده است. بعضی گزارش‌ها بیان‌کننده افزایش میزان کلروفیل با افزایش تنش رطوبتی (Barraclough and Kate, 2001) و بعضی نشان‌دهنده کاهش غلظت کلروفیل در شرایط تنش رطوبتی است (کافی و رستمی، ۱۳۸۶). در برخی مطالعات، گزارش‌هایی در رابطه با واکنش متفاوت (بیرانوند و همکاران، ۱۴۰۱) و یا عدم تفاوت (موحدی دهنوی و همکاران، ۱۳۸۳) کلروفیل به خشکی در ارقام حساس و متحمل به خشکی گیاهان زراعی مطرح شده است. بنا بر اظهارات عمادی و همکاران (۱۴۰۱) و قنبری و همکاران (۱۴۰۰) با افزایش فاصله آبیاری در گیاه سورگوم، محتوای کلروفیل کل و کلروفیل a و b در مقایسه با شاهد کاهش یافت.

**آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان:** براساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، مقدار فعالیت آنزیم پراکسیداز در اندام هوایی به طور معنی‌داری تحت تأثیر رژیم آبیاری، اثرهای متقابل رژیم آبیاری در رقم، میکوریزا در رقم و رژیم آبیاری در میکوریزا در رقم قرار گرفت. همچنین، تأثیر رژیم آبیاری و رقم و برهمکنش رژیم آبیاری در میکوریزا، رژیم آبیاری در رقم، میکوریزا در رقم و رژیم آبیاری در میکوریزا در رقم بر فعالیت آنزیم کاتالاز در اندام هوایی معنی‌دار بود. مقایسه میانگین اثر ساده عامل‌ها (جدول ۳) نشان داد تنش متوسط خشکی تأثیر معنی‌داری بر مقدار فعالیت آنزیم پراکسیداز در اندام هوایی نداشت، اما تنش شدید کم‌آبی موجب افزایش ۱۱/۸ درصدی این آنزیم شد؛ درحالی‌که مقدار کاتالاز اندام هوایی در شرایط تنش متوسط و شدید کم‌آبی افزایش به‌ترتیب ۶/۶ و ۲۰/۳ درصدی داشت. بیشترین و کمترین مقدار کاتالاز اندام هوایی از ارقام پیام و کیمیا (به‌ترتیب ۰/۰۳۹ و ۰/۰۳۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بدست آمد.

سازوکارهای آنزیمی و غیرآنزیمی، یکی دیگر از ساز و کارهای حفاظتی گیاهان در مقابله با تنش خشکی است (Tian and Li, 2006). آنزیم کاتالاز همانند آنزیم پراکسیداز، معمولاً در شرایط تنش در اندام هوایی افزایش می‌یابد و موجب سرکوب رادیکال‌های آزاد و تعدیل تنش می‌شود. در اینجا نیز تغییرات میزان کاتالاز در اندام هوایی تحت تأثیر هر دو عامل ژنتیک و محیط قرار گرفت، اما کاربرد توأم میکوریزا و

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

**جدول ۳- مقایسه میانگین صفات بیوشیمیایی اندام هوایی و دانه سورگوم**

| تیمارها | | کلروفیل a | کلروفیل b | کلروفیل کل | پراکسیداز اندام هوایی | کاتالاز اندام هوایی | مس اندام هوایی | مس دانه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه) | | | (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه) | | (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | |
| رژیم آبیاری | ۸۰ میلی متر تبخیر | ۰/۰۰۳۷$^{a}$ | ۰/۰۰۲۷$^{a}$ | ۰/۰۰۶۴$^{a}$ | ۰/۰۶۳$^{b}$ | ۰/۰۳۲۹$^{b}$ | ۱۳/۵$^{a}$ | ۲/۳۷$^{a}$ |
| | ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر | ۰/۰۰۳$^{b}$ | ۰/۰۰۲۵$^{b}$ | ۰/۰۰۵۵$^{b}$ | ۰/۰۶۳$^{b}$ | ۰/۰۳۵$^{b}$ | ۱۲/۲$^{b}$ | ۲/۲۴$^{a}$ |
| | ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر | ۰/۰۰۲۳$^{c}$ | ۰/۰۰۲۲$^{c}$ | ۰/۰۰۴۵$^{c}$ | ۰/۰۷۲$^{a}$ | ۰/۰۴۱$^{a}$ | ۹/۱$^{c}$ | ۲/۰۶$^{b}$ |
| | LSD (5%) | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۰۰۲۴ | ۰/۷۴۱۸ | ۱۴۵۱/۰ |
| میکوریزا | کاربرد | ۰/۰۰۳۲$^{a}$ | ۰/۰۰۲۶$^{a}$ | ۰/۰۰۵۹$^{a}$ | ۰/۰۶۶۳ | ۰/۰۳۶۶ | ۱۱/۵۵۶ | ۲/۳۷$^{a}$ |
| | عدم کاربرد | ۰/۰۰۲۷$^{b}$ | ۰/۰۰۲۳$^{b}$ | ۰/۰۰۵۱$^{b}$ | ۰/۰۶۶۹ | ۰/۰۳۶۵ | ۱۱/۷۷۸ | ۲/۰۸$^{b}$ |
| رقم | پیام | ۰/۰۰۳۱$^{a}$ | ۰/۰۰۲۷$^{a}$ | ۰/۰۰۵۷$^{a}$ | ۰/۰۶۵۳ | ۰/۰۳۸۹$^{a}$ | ۱۱/۶۶۷ | ۲/۲۸۵$^{a}$ |
| | کیمیا | ۰/۰۰۲۹$^{b}$ | ۰/۰۰۲۳$^{b}$ | ۰/۰۰۵۲$^{b}$ | ۰/۰۶۶۲ | ۰/۰۳۴۱$^{b}$ | ۱۱/۶۲۵ | ۲/۲۹۰$^{a}$ |
| | سپیده | ۰/۰۰۳۱$^{a}$ | ۰/۰۰۲۵$^{b}$ | ۰/۰۰۵۶$^{a}$ | ۰/۰۶۸۳ | ۰/۰۳۶۵$^{a}$ | ۱۱/۷۰۸ | ۲/۱۱۷$^{b}$ |
| | LSD (5%) | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۳ | | ۰/۰۰۲۴ | | ۰/۱۴۵۱ |

**میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح ۵٪ هستند.**

**ادامه جدول ۳-**

| تیمارها | | آهن اندام هوایی | آهن دانه | منگنز اندام هوایی | منگنز دانه | روی اندام هوایی | روی دانه | پروتئین دانه (درصد) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | | | | | |
| رژیم آبیاری | ۸۰ میلی‌متر تبخیر | ۲۴۶/۵$^{a}$ | ۲۹/۴۱$^{a}$ | ۱۳۵/۷$^{a}$ | ۱۳/۵۴$^{a}$ | ۵۴/۹۵$^{a}$ | ۱۵/۴۴$^{a}$ | ۱۳/۰۰۸$^{b}$ |
| | ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر | ۲۱۳/۷$^{b}$ | ۲۸/۹۹$^{b}$ | ۱۰۷/۱$^{b}$ | ۱۳/۱۴$^{b}$ | ۴۷/۳۳$^{b}$ | ۱۵/۱۷$^{b}$ | ۱۳/۲۵۷$^{a}$ |
| | ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر | ۱۷۰/۷$^{c}$ | ۲۸/۶۵$^{c}$ | ۵۸/۷$^{c}$ | ۱۲/۷۴$^{c}$ | ۳۶/۳۷$^{c}$ | ۱۴/۹۳$^{c}$ | ۱۳/۳۳۱$^{a}$ |
| | LSD (5%) | ۵/۶۲۶۷ | ۰/۱۷۲۰ | ۸/۹۲۱۹ | ۰/۲۱۶۳ | ۴/۱۲۳۱ | ۰/۲۱۶۹ | ۰/۱۷۰۲ |
| میکوریزا | کاربرد | ۲۰۹/۹۴۴ | ۲۹/۱۹$^{a}$ | ۱۰۱/۸۳ | ۱۳/۳۷$^{a}$ | ۴۵/۹۱۷ | ۱۵/۳۱$^{a}$ | ۱۳/۳۴$^{a}$ |
| | عدم کاربرد | ۲۱۰/۷۷۸ | ۲۸/۸۴$^{b}$ | ۹۹/۱۳ | ۱۲/۹۱$^{b}$ | ۴۶/۵۲۸ | ۱۵/۰۵$^{b}$ | ۱۳/۰۵$^{b}$ |
| رقم | پیام | ۲۱۱/۲۰۸ | ۲۸/۹۵۴۶ | ۹۸/۷۵۰ | ۱۳/۲۰۱ | ۴۶/۰۸۳ | ۱۵/۲۲۳ | ۱۳/۲۵$^{a}$ |
| | کیمیا | ۲۰۷/۴۱۷ | ۲۸/۹۹۷۶ | ۱۰۱/۵۰۰ | ۱۳/۱۴۱ | ۴۶/۱۶۷ | ۱۵/۱۴۵ | ۱۳/۲۷$^{a}$ |
| | سپیده | ۲۱۲/۴۵۸ | ۲۹/۱۰۸۳ | ۱۰۱/۲۰۸ | ۱۳/۰۹۶ | ۴۶/۴۱۷ | ۱۵/۱۸۰ | ۱۳/۰۶$^{b}$ |
| | LSD (5%) | | | | | | | ۰/۱۷۰۲ |

**میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح ۵٪ هستند.**

ازتوباکتر موجب تولید کمترین میزان کاتالاز اندام هوایی شد و عدم کاربرد کود زیستی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد که علت را می‌توان به بهبود شرایط رشد ناشی از کاربرد کود زیستی نسبت داد.

افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در سورگوم در شرایط تنش خشکی (عمادی و همکاران، ۱۴۰۱؛ قنبری و همکاران، ۱۴۰۰؛ نجفی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸)، در گلرنگ بهاره تحت تأثیر مصرف بالای کود فسفر در تیمار عدم به کارگیری کود زیستی در شرایط تنش رویشی و زایشی (حشمتی و همکاران، ۱۳۹۵) و در گندم در تیمار عدم به

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

**جدول ۴- مقایسه میانگین اثرهای متقابل دو گانه رژیم آبیاری در میکوریزا بر مقدار مس اندام هوایی سورگوم دانه‌ای**

| تیمارها | | کلروفیل a | مس اندام هوایی |
|---|---|---|---|
| تنش کم آبی | میکوریزا | (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه) | (میلی‌گرم بر کیلوگرم) |
| ۸۰ میلی‌متر تبخیر | کاربرد | ۰/۰۰۴۱$^{a}$ | ۱۲/۶$^{b}$ |
| | عدم کاربرد | ۰/۰۰۳۲$^{b}$ | ۱۴/۵$^{a}$ |
| ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر | کاربرد | ۰/۰۰۳۲$^{b}$ | ۱۲/۶$^{b}$ |
| | عدم کاربرد | ۰/۰۰۲۷$^{c}$ | ۱۱/۸$^{b}$ |
| ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر | کاربرد | ۰/۰۰۲۳$^{d}$ | ۹/۳$^{c}$ |
| | عدم کاربرد | ۰/۰۰۲۲$^{d}$ | ۹/۰$^{c}$ |
| LSD (5%) | | ۰/۰۰۰۴ | ۱/۱۰ |

**میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح ۵٪ هستند.**

**جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل دو گانه میکوریزا در رقم بر برخی صفات بیوشیمیایی اندام هوایی و دانه سورگوم دانه‌ای**

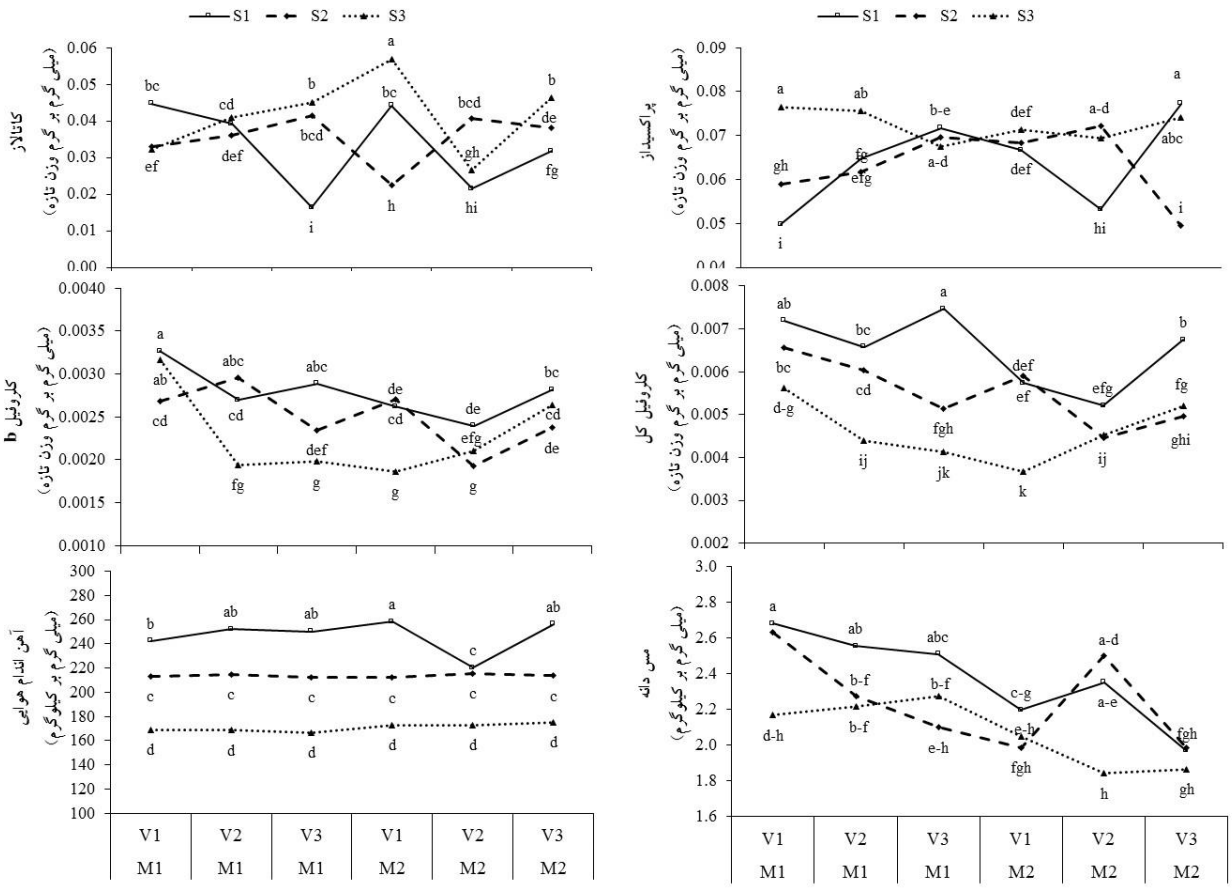
| تیمارها | | کلروفیل a | آهن دانه | منگنز دانه | روی دانه |
|---|---|---|---|---|---|
| میکوریزا | رقم | (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه) | (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | |
| کاربرد | پیام | ۰/۰۰۳۴ | ۲۹/۳$^{a}$ | ۱۳/۵$^{a}$ | ۱۵/۴$^{a}$ |
| | کیمیا | ۰/۰۰۳۱$^{b}$ | ۲۸/۸$^{bc}$ | ۱۳/۱$^{abc}$ | ۱۵/۱$^{b}$ |
| | سپیده | ۰/۰۰۳۱$^{b}$ | ۲۹/۳$^{a}$ | ۱۳/۴$^{ab}$ | ۱۵/۱$^{a}$ |
| عدم کاربرد | پیام | ۰/۰۰۲۷$^{de}$ | ۲۸/۵$^{c}$ | ۱۲/۸$^{cd}$ | ۱۵/۰$^{b}$ |
| | کیمیا | ۰/۰۰۲۶$^{e}$ | ۲۹/۱$^{ab}$ | ۱۳/۱$^{bcd}$ | ۱۵/۲$^{ab}$ |
| | سپیده | ۰/۰۰۳۰$^{c}$ | ۲۸/۸$^{bc}$ | ۱۲/۷$^{d}$ | ۱۴/۹$^{b}$ |
| LSD (5%) | | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۳۷۳۲ | ۰/۴۰۵۰ | ۰/۳۳۰۷ |

**میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح ۵٪ هستند.**

کارگیری کود نانو و متانول (بیرانوند و همکاران، ۱۴۰۱) و عدم به کارگیری کائولین در تراکم بوته بالا (رشیدیان و همکاران، ۱۴۰۱) در شرایط دیم گزارش شده است. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان همچون سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، گلوتامین ردوکتاز، کاتالاز، پراکسیداز فاکتور مهمی در تحمل به تنش‌های محیطی در گیاهان مختلف است (Jithesh *et al.*, 2006). پژوهشگران حفاظت آنزیمی، محافظت از حامل‌ها، آنتی‌پورترها و آنزیم‌های مؤثر در ترابری یون‌ها و همچنین کاهش پتانسیل اسمزی به‌وسیله تجمع اسمولیت‌ها و حفظ آماس سلول جهت تثبیت فرآیندهایی نظیر فتوسنتز، فعالیت‌های آنزیمی و تکثیر سلولی با افزایش تدریجی تنش خشکی را از جمله مهمترین دلایل فیزیولوژیک افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی تحت شرایط تنش رطوبتی عنوان کرده‌اند (Amjad Ali *et al.*, 2009).

**عناصر ضروری در اندام هوایی و دانه:** نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد اثر رژیم آبیاری بر مقدار مس، آهن، منگنز و روی اندام هوایی و دانه؛ اثر میکوریزا بر مس، آهن، منگنز و روی دانه؛ اثر رقم بر مس دانه؛ برهمکنش رژیم آبیاری در میکوریزا بر مس اندام هوایی و آهن دانه؛ برهمکنش رژیم آبیاری در رقم بر آهن اندام هوایی؛ برهمکنش میکوریزا در رقم بر آهن اندام هوایی و آهن، منگنز و روی دانه؛ برهمکنش سه گانه رژیم آبیاری در میکوریزا در رقم بر مس

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]



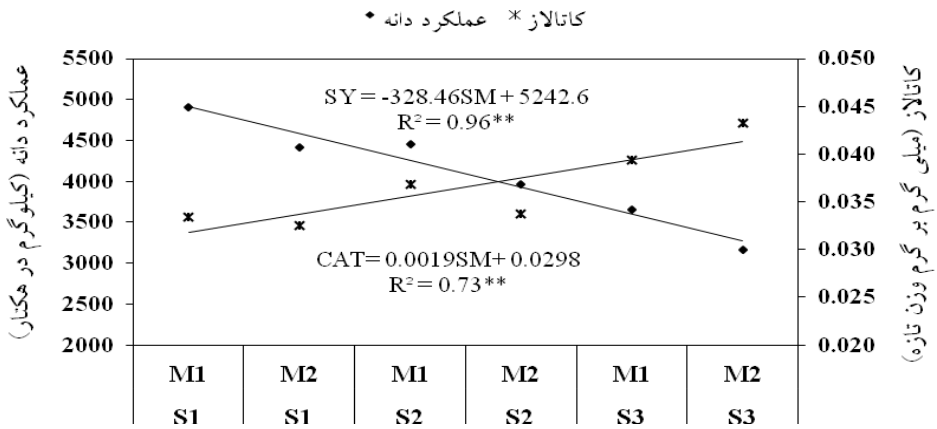

**شکل ۱- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه رژیم آبیاری (S) در میکوریزا (M) در رقم (V) بر برخی صفات بیوشیمیایی اندام هوایی سورگوم دانه‌ای. S1، S2 و S3: به‌ترتیب رژیم آبیاری از طریق آبیاری پس از ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس الف؛ M1 و M2: به‌ترتیب کاربرد و عدم کاربرد میکوریزا؛ V1، V2 و V3: به‌ترتیب ارقام پیام، کیمیا و سپیده. میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.**

دانه و آهن اندام هوایی معنی‌دار بود.

مقایسه میانگین اثر ساده عامل‌ها (جدول ۳) نشان داد با افزایش تنش خشکی مقدار تمام عناصر ضروری در اندام هوایی و دانه کاسته شد. تنش خشکی متوسط و شدید موجب کاهش ۹/۸ و ۳۲/۵ درصدی مس اندام هوایی، ۵/۵ و ۱۳/۰ درصدی مس دانه، ۱۳/۳ و ۳۰/۷ درصدی آهن اندام هوایی، ۱/۴ و ۲/۶ درصدی آهن دانه، ۲۱/۱ و ۵۶/۸ درصدی منگنز اندام هوایی، ۲/۹ و ۵/۹ درصدی منگنز دانه، ۱۳/۹ و ۳۳/۸ درصدی روی اندام هوایی، و ۱/۷ و ۳/۳ درصدی روی در دانه گردید. مقایسه میانگین اثر ساده رقم نشان داد که بیشترین مقدار مس دانه به‌مقدار مساوی مربوط به ارقام پیام و کیمیا (۲/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود و کمترین آن در رقم سپیده (۲/۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. کاربرد میکوریزا مقدار مس، آهن، منگنز و روی دانه را به‌ترتیب ۱۲/۴، ۱/۲۲، ۳/۴۸ و ۱/۶۸ بهبود بخشید. براساس مقایسه میانگین برهمکنش دو گانه عامل‌ها، تنش شدید کم‌آبی و عدم کاربرد میکوریزا موجب کاهش ۳۷/۹ درصدی میزان مس اندام هوایی نسبت به شرایط نرمال آبیاری و عدم کاربرد میکوریزا شد (جدول ۴). مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه عامل‌ها (شکل ۲) نشان داد بیشترین میزان آهن اندام هوایی از شرایط نرمال آبیاری و عدم کاربرد میکوریزا در رقم پیام حاصل شد که در تنش شدید خشکی در تمام سطوح میکوریزا و در کلیه ارقام با ۳۲/۶ درصد کاهش به کمترین میزان خود رسید.

مس در گیاه برای فعالیت‌های آنزیمی (سیستم‌های آنزیمی

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]




**شکل ۲- روند تغییرات عملکرد دانه (GY) و کاتالاز (CAT) سورگوم دانه‌ای در سطوح مختلف برهمکنش رژیم آبیاری × میکوریزا. S1، S2 و S3: رژیم آبیاری از طریق آبیاری پس از ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس الف؛ M1 و M2: به‌ترتیب کاربرد و عدم کاربرد میکوریزا**

اکسیداز- کاتالاز) ضروری است. آهن یکی از عناصر ضروری کم‌مصرف برای رشد تمامی گیاهان است و در صورت کمبود آن، سبزینه (کلروفیل) به مقدار کافی در سلول‌های برگ تولید نمی‌شود. منگنز در واکنش‌های انتقال الکترون در گیاه دخیل بوده، در تولید کلروفیل نیز نقش دارد. میان عناصر ضروری در گیاهان برهمکنش وجود دارد (ملکوتی و طهرانی، ۱۳۷۷). همزیستی مایکوریزا با گیاه شبدر تا ۶۲ درصد سبب افزایش جذب مس شد (Kizhaeral *et al.*, 2011). قارچ گلوموس سبب بهبود جذب نیتروژن، پتاسیم، منیزیم، مس و روی در خاک‌های فقیر از طریق افزایش منطقه تخلیه عناصر غذایی به وسیله ریشه‌های میکوریزایی نسبت به گیاهان غیرمیکوریزایی می‌شود (Smith and Read, 2008). هیف‌های خارجی در خاک گسترده شده و یک سطح جذب بالایی را برای فسفر (Li *et al.*, 1991a)، مس (Li *et al.*, 1991b)، روی (Chen *et al.*, 2000) و یا نیتروژن (Hawkins and George, 2001) ایجاد می‌کنند. Hernandez و همکاران (۱۹۹۵) دریافتند که برهمکنش ازتوباکتر و مایکوریزا باعث افزایش جذب آب و مواد غذایی توسط ریشه می‌شود. نتایج آزمایشات مختلف نشان داد تنش خشکی موجب کاهش جذب برخی عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف شد، لیکن کاربرد متانول و نانو کود (بیرانوند و همکاران، ۱۴۰۱) و ماده ضدتعرق کائولین (رشیدیان و همکاران، ۱۴۰۱) به افزایش جذب عناصر در شرایط تنش خشکی کمک نمود.

**پروتئین خام دانه:** میزان پروتئین خام دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تمامی اثرهای ساده رژیم آبیاری، میکوریزا و رقم قرار گرفت (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش شدت تنش کم‌آبی، مقدار پروتئین خام دانه افزایش یافت. تنش متوسط و شدید خشکی به‌ترتیب موجب افزایش ۱/۹ و ۲/۴ درصدی مقدار پروتئین خام دانه شد. در میان ارقام، رقم کیمیا با میانگین ۱۳/۲۷ درصد، بیشترین میزان پروتئین خام دانه را داشت و در رقم سپیده کمترین مقدار پروتئین خام دانه با میانگین ۱۳/۰۶ درصد، مشاهده شد. همچنین کاربرد میکوریزا موجب افزایش ۲/۱ درصدی پروتئین خام دانه نسبت به شرایط عدم کاربرد میکوریزا شد (جدول ۳).

افزایش در میزان پروتئین خام سورگوم در شرایط تنش خشکی توسط نجفی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸) گزارش شده است. دلیل افزایش پروتئین خام، همبستگی منفی آن با کربوهیدرات محلول و کاهش کربوهیدرات محلول ناشی از کاهش تجزیه کربوهیدرات‌های نامحلول، توقف رشد، کاهش سرعت انتقال مواد و کاهش سنتز ساکاروز به‌دلیل عدم فعال‌سازی آنزیم ساکاروز فسفات سنتتاز تحت شرایط تنش خشکی (Oliviera-Neto *et al.*, 2009) بیان شده است. به

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

گزارش حشمتی و همکاران (۱۳۹۵) افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و میزان پروتئین‌های محلول برگ در شرایط تنش در مراحل رویشی و زایشی می‌تواند اثرهای سوء ناشی از تنش را کاهش دهد.

**روند تغییرات عملکرد دانه و کاتالاز:** روند تغییرات عملکرد دانه سورگوم تحت تأثیر متقابل رژیم آبیاری و کاربرد میکوریزا نشان داد که عملکرد دانه با افزایش تنش کم‌آبی از یک رابطه خطی معنی‌دار و منفی در هر دو شرایط کاربرد و عدم کاربرد میکوریزا ($R^2= 0.96^{**}$) پیروی نمود (شکل ۲). تنش کم‌آبی ناشی از رژیم‌های آبیاری ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر به ترتیب موجب کاهش ۹/۸ و ۲۶/۸ درصدی عملکرد دانه نسبت به آبیاری نرمال (رژیم آبیاری ۸۰ میلی‌متر تبخیر) شد. اگر چه کاربرد میکوریزا موجب بهبود عملکرد دانه به‌ترتیب ۱۰/۲، ۱۱/۱ و ۱۳/۵ درصد در رژیم‌های آبیاری ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر (نقاط واقعی عملکرد دانه) شد، لیکن نتوانست جبران خسارت ناشی از تنش کم‌آبی را نماید و لذا روند تغییرات عملکرد دانه در کل کاهشی بود (شکل ۲).

برخلاف عملکرد دانه، روند تغییرات کاتالاز تحت تأثیر متقابل سطوح رژیم آبیاری و کاربرد میکوریزا نشان داد که میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان کاتالاز با افزایش تنش کم‌آبی از یک رابطه خطی معنی‌دار و مثبت در هر دو شرایط کاربرد و عدم کاربرد میکوریزا ($R^2= 0.73^{**}$) پیروی نمود (شکل ۲). هر چند واکنش کاتالاز به کاربرد میکوریزا متفاوت بود (نقاط واقعی میزان کاتالاز)، لیکن فعالیت کاتالاز با افزایش تنش کم‌آبی زیاد شد و در رژیم‌های آبیاری ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر نسبت به آبیاری نرمال به‌ترتیب ۶/۶ و ۲۰/۲ درصد افزایش یافت (شکل ۲).

کاربرد کودهای زیستی می‌تواند در شرایط تنش خشکی، کاهش عملکرد گیاهان زراعی را تا حدودی تعدیل نماید و تحمل گیاه را به تنش کم‌آبی افزایش دهد (Benabdellah *et al.*, 2011; Latef and Chaoxing, 2010). برخی محققین نیز معتقدند که همزیستی میکوریزایی، روابط آبی گیاه را اصلاح و باعث افزایش جذب آب و عناصر غذایی از خاک می‌شود و رشد و عملکرد را بهبود می‌بخشد (Smith and Read, 2008). نتایج تحقیقات مختلف نیز حاکی از افزایش کاتالاز (حشمتی و همکاران، ۱۳۹۵) و کاهش عملکرد دانه در گیاه سورگوم (مظاهری‌لقب و کاکایی، ۱۳۹۴؛ Ahmed *et al.*, 2016 Jabereldar *et al.*, 2017; Amjad Ali *et al.*, 2009) است، که با یافته‌های حاصل از این پژوهش مطابقت دارد.

## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از این پژوهش مشخص شد که با افزایش تنش خشکی میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند پراکسیداز و کاتالاز افزایش یافت که نشان‌دهنده تلاش گیاه سورگوم دانه‌ای در سرکوب رادیکال‌های آزاد و در نتیجه تعدیل تنش خشکی بود، اما مقدار رنگیزه‌ها و جذب عناصر غذایی ضروری پرمصرف و کم‌مصرف و در نهایت عملکرد دانه کاهش نشان داد. میزان پروتئین خام دانه نیز با افزایش تنش خشکی، افزایش یافت. کاربرد میکوریزا عمدتاً موجب افزایش عناصر ضروری در اندام هوایی و دانه و کمک به تعدیل تنش خشکی شد. در مجموع رقم سپیده با کاربرد میکوریزا در رژیم آبیاری پس از ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر، ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری، بیشترین عملکرد دانه و پروتئین خام دانه را داشت.

## منابع

امیرآبادی، محسن، اردکانی، محمدرضا، رجالی، فرهاد، و برجی، محسن (۱۳۸۹). بررسی اثرات ازتوباکتر کروکوکوم و قارچ میکوریزی در سطوح مختلف فسفر بر برخی صفات مورفولوژیکی و خصوصیات کیفی ذرت علوفه‌ای (سینگل کراس ۷۰۴). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۱(۱)، ۴۹-۵۶. https://ijswr.ut.ac.ir/article_21038_b90e1c8ada2b410256d0b73dc9ddc93c.pdf

بیرانوند، الهام، خورگامی، علی، رفیعی، مسعود، میردریکوند، رضا، و وفایی، سید حسین (۱۴۰۱). اثر محلول‌پاشی نانوکود و متانول بر

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گندم دیم در شرایط آبیاری تکمیلی. *نشریه فرآیند و کارکردهای گیاهی*، ۱۱(۵۱)، ۲۲۵-۲۳۹. DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.51.14.1

پارسا مطلق، بهاره، محمودی، سهراب، سیاری زهان، محمدحسن و نقی‌زاده، مهدی (۱۳۹۰). اثر قارچ میکوریز و کود فسفر بر غلظت عناصر غذایی برگ و رنگدانه‌های فتوسنتزی لوبیا معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) در شرایط تنش شوری. *نشریه آگرواکولوژی*، ۲، ۲۴۴-۲۳۳. https://doi.org/10.22067/JAG.V3I2.13531

حشمتی، سیاوش، امینی دهقی، مجید، و فتحی امیرخیز، کیوان (۱۳۹۵). بررسی اثر کود شیمیایی و زیستی فسفر بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و برخی صفات بیوشیمیایی گلرنگ بهاره تحت تنش کمبود آب. *نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۶، ۲۰۳-۲۱۳. https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.6.19.203

حمزه‌ای، جواد، و صادقی می‌آبادی، فرشید (۱۳۹۳). تأثیر فواصل آبیاری و قارچ میکوریز آربوسکولار بر شاخص کلروفیل، عملکرد و اجزای عملکرد سورگوم دانه‌ای. *مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۴(۱۲)، ۲۱۱-۲۲۱. file:///C:/Users/rafiee/Downloads/jcpp-v4n12p211-fa%20(1).pdf

رشیدیان، امین، رفیعی، مسعود، خورگامی، علی، میردریکوند، رضا، و وفایی، سید حسین (۱۴۰۱). اثر تراکم و کائولین بر عملکرد و خصوصیات بیوشیمیایی ارقام گندم (*Triticum aestivum* L.) در شرایط دیم. *نشریه فرآیند و کارکردهای گیاهی*، ۱۱(۴۷)، ۱۲۹-۱۴۴. DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.16.5

کافی، محمد، و رستمی، مجید (۱۳۸۶). اثر تنش خشکی در مرحله رشد زایشی بر عملکرد، اجزای عملکرد و درصد روغن سه ژنوتیپ گلرنگ در شرایط آبیاری با آب شور. *مجله پژوهش‌های زراعی ایران*، ۵(۱)، ۱۳۱-۱۲۱. https://doi.org/10.22067/GSC.V5I1.903

علیزاده، امین (۱۳۹۰). طراحی سیستم‌های آبیاری. انتشارات دانشگاه امام رضا، مشهد.

عمادی، علی‌رضا، علیزاده، امید، امیری، بهرام، پیراسته انوشه، هادی، و زارع، مهدی (۱۴۰۱). تأثیر تنش خشکی و شوری بر عملکرد، ویژگی‌های بیوشیمیایی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سورگوم علوفه‌ای. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۶(۲)، ۲۱۷-۲۳۳. https://doi.org/10.22092/jwra.2022.358226.919

قنبری، مجید، مختصی بیدگلی، علی، زنگانه، زینب، منصور، و قناعی پاشاکی، کامران (۱۴۰۰). تأثیر مالچ مواد آلی بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) در پاسخ به رژیم‌های مختلف آبیاری. *مجله تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک*، ۳(۱)، ۷۷-۹۵. https://doi.org/10.22034/CSRAR.2021.269538.1082

مظاهری لقب، حجت‌اله، و کاکایی، مهدی (۱۳۹۴). مطالعه تنوع ژنتیکی، قابلیت توارث و روابط همبستگی مرتبط با خسارت به سرخرطومی برگ (*Medicago sativa* L.) در ژرمپلاسم یونجه (*Hypera postica* Gyll.)، *پژوهش‌های ژنتیک گیاهی*، ۲(۱)، ۶۳-۷۶. http://pgr.lu.ac.ir/article-1-43-fa.html

ملکوتی، محمدجواد، و طهرانی، محمد مهدی (۱۳۷۷). نقش ریزمغذی‌ها در افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی «عناصر خرد با تأثیر کلان». انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

موحدی دهنوی، محسن، مدرس ثانوی، سید علی محمد، سروش‌زاده، علی، و جلالی، مختار (۱۳۸۳). تغییرات میزان پرولین، قندهای محلول کل، کلروفیل (SPAD) و فلورسانس کلروفیل در ارقام گلرنگ پاییزه تحت تنش خشکی و محلول پاشی روی و منگنز. *نشریه مدیریت بیابان*، ۹(۱)، ۱۰۷-۹۳. https://www.noormags.ir/view/fa/articlepage/444108

نجفی‌نژاد، حبیب، راوری، سید ذبیح‌اله، و جواهری، محمد علی (۱۳۹۸). تغییرات عملکرد علوفه و برخی خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک کوشیا، ارزن، سورگوم و ذرت علوفه‌ای تحت تنش خشکی. *نشریه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۱۳، ۵۳۵-

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

https://doi.org/10.30495/JCEP.2020.671172 .۵۵۴

Ahmed, A. A., Hassan, M. S. M., & El Naim, A. M. (2016). Evaluation of some local sorghum genotypes in north Kordofan of Sudan semi-arid agro-ecological environment. *International Journal of Agriculture and Forestry*, *6*(1), 54-57. https://doi.org/10.5923/j.ijaf.20160601.06

Amjad Ali, M., Abbas, A., Niaz, S., Zulkiffal, M., & Ali, S. (2009). Morphophysiological criteria for drought tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) at seedling and post-anthesis Ssages. *International Journal of Agricultural Biotechnology*, *11*, 674-680. https://digitalcommons.memphis.edu/facpubs/14006

Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, *23*, 112-121. https://www.ijsr.net/archive/v4i11/NOV151021.pdf

Assefa, Y. & Staggenborg, S. A. (2010). Grain sorghum yield with hybrid advancement and change in agronomic practices from 1957 through 2008. *Agronomy Journal*, *102*, 703-706. https://doi.org/10.2134/agronj2009.0314

Barraclough, P. B. & Kate, J. (2001). Effect of water stress on chlorophyll meter reading in wheat. *Plant Nutrition*, 722-723. DOI: 10.1007/0-306-47624-X_350

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207. https://link.springer.com/article/10.1007/BF00018060

Benabdellah, K., Abbas, Y., Abourouh, M., Aroca, R., & Azcon, R. (2011). Influence of two bacterial isolates from degraded and non-degraded soils and arbuscular mycorrhizae fungi isolated from semi-arid zone on the growth of Trifolium repens under drought conditions: Mechanisms related to bacterial effectiveness. *European Journal of Soil Biology*, *47*, 303-309. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.07.004

Chen, M. D., Song, Y. M., & Lin, P. Y. (2000). Zinc effects on hyperglycemia and hypoleptinemia in streptozotocin - induced diabetic mice. *Hormone and Metabolic Research*, *32*(3), 107-109. https://jnfs.ssu.ac.ir/article-1-270-en.pdf

Dhindsa, R. S., Dhindsa, P., & Thorpe, A. T. (1981). Leaf senescence correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation and decrease levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, *32*, 93-101. https://www.google.com/search?q

Hawkins H. J. & George, E. (2001). Reduced N-15-nitrogen transport through arbuscular mycorrhizal hyphae to *Triticum aestivum* L. supplied with ammonium vs. nitrate nutrition. *Annals Botany*, *87*, 303-311. https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1305

Hernandez, A. N., Hernandez, A., & Heydrich, M. (1995). Selection of rhizobacteria for use in maize cultivation. *Cultivos Tropicales*, *6*, 5-8. doi: 10.1016/j.apsoil.2007.12.008

IPCC. (2019). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (eds. Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., et al.,). Cambridge University Press, Cambridge and New York. https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/

Jabereldar, A. A., El Naim, A. M., Abdalla, A. A., & Dagash, Y. M. (2017). Effect of water stress on yield and water use efficiency of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in semi-arid environment. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 7(1), 1-6. https://doi.org/10.5923/j.ijaf.20170701.01

Jithesh, M. N., Prashanth, S. R., Sivaprakash, K. R., & Parida, A. K. (2006). Antioxidative response mechanisms in halophytes: Their role in stress defense. *Journal of Genetics*, *85*, 237-254. https://link.springer.com/article/10.1007/BF02935340

Kizhaeral, S. S., Virgine Tenshia, J. S., Jayalakshmi, K., & Ramachandran, V. (2011). Antioxidant enzyme activities in arbuscular mycorrhizal (*Glomus intraradices*) fungus inoculated and non-inoculated maize plants under zinc deficiency. *Indian Journal of Microbiology*, *51*, 37-43. DOI: 10.1007/s12088-011-0078-5

Kjeldal, S. E. (1998). An investigation of several psychological factors impinging on the perception of fresh fruits and vegetables. Unpublished Ph.D Thesis, University of New England, Australia.

Latef, A. A. & Chaoxing, H. (2010). Arbuscular mycorrhizal influence on growth, photosynthetic pigments, osmotic adjustment and oxidative stress in tomato plants subjected to low temperature stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, *33*, 1217-1225. DOI 10.1007/s11738-010-0650-3

Li, X. L., George, E., & Marschner, H. (1991). Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil. *Plant and Soil*, 136, 41-48. https://www.jstor.org/stable/42939203

Li, X. L., George, E., & Marschner, H. (1991) Acquisition of phosphorus and copper by VAM hyphae and root to shoot transport in white clover. *Plant and Soil*, *136*, 49-57. https://www.jstor.org/stable/42939204

Mae-Adam, J. W. & Nelson Sharp, C. J. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall Fese Ue. *Journal of Plant Physiology*, *99*, 872-878. https://doi.org/10.1104/pp.99.3.872

Menezes, C. B., Saldanha, D. C., Santos, C. V., Andrade, L. C., Mingote Júlio, M. P., Portugal, A. F., & Tardin, F. D. (2015). Evaluation of grain yield in sorghum hybrids under water stress. *Genetics and Molecular Research*, *14*(4), 12675-12683. https://doi.org/10.4238/2015.October.19.11

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

Oliviera-Neto, C. F., Silva-Lobato, A. K., Goncalves-Vidigal, M. C., Costa, R. C. L., Santos Filho, B. G., Alves, G. A. R., & Silva-Maia, W. J. M. (2009). Carbon compounds and chlorophyll contents in sorghum to water deficit during three growth stages. *Science and Technology*, *7*, 588-593. https://www.researchgate.net/publication/286959284

Valentine, A. J., Mortimer, P. E., Lintnaar, A., & Borgo, R. (2006). Drought responses of arbuscular mycorrhizal grapevines. *Symbiosis*, *41*, 127-133. https://dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/78239/VOLUME41-NUMBER%203-2006-PAGE%20127.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ryan, J., Estefan, G., & Rashid, A. (2007). Soil and plant analysis laboratory manual. ICARDA. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2356297

Smith, S. E. & Read, D. J. (2008). Mycorrhizal Symbiosis, 3th Ed. Academic Press, Oxford. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1398632

Tian, X. & Li, Y. (2006). Nitric oxide treatment alleviates drought stress in wheat seedlings. *Biological Plantarum*, *50*, 775-778. https://bp.ueb.cas.cz/pdfs/bpl/2006/04/53.pdf

Varma, A. (2008). Mycorrhizae: State of the Art, Genetics and Molecular Biology Eco-Function, Biotechnology, Eco-physiology, Structure and Systematic. Springer Verlag Berlin Heidelberg. https://books.google.com/books/about/Mycorrhiza.html?id=ISp8CaZG8sgC

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]

# Biochemical response of grain sorghum cultivars to drought stress and mycorrhiza

**Sadegh Azadbakht[1], Masoud Rafiee[2*], Ali Khorgamy[1]**

**[1] Department of Agronomy and Plant Breeding, Khorramabad branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran**
**[2] Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorramabad, Iran**
**(Received: 2023/05/10, Accepted: 2023/08/08)**

**Abstract**

Low irrigation is one of the ways to reduce water consumption in heat-loving and water-loving crops. On the other hand, the use of mycorrhiza as a biofertilizer is also one of the effective solutions in increasing the absorption of water and nutrients in the conditions of water shortage stress. In addition, the selection of varieties compatible with the region in order to achieve production potential is another way to deal with drought stress in each region. For this purpose, the effect of irrigation regime at three levels of 80 (control), 120 (mild stress) and 160 (severe stress) mm of evaporation from the evaporation pan of class A and biofertilizer including application and non-application of mycorrhiza on three grain sorghum cultivars Kimia, Payam and Sepideh It was investigated in the form of randomized complete block design in the form of a split plot in the summer cultivation of 2016 in Kohdasht city of Lorestan. The results showed that the amount of zinc, copper, manganese and iron in the seeds decreased with the increase in water shortage, but the crude protein content of the seeds increased. The application of mycorrhiza mainly increased the essential elements in shoots and seeds and helped to moderate water deficit stress. The presence of interaction between the factors indicated the different response of cultivars at the levels of mycorrhizal application to water deficit stress in terms of many traits; so, in the conditions of extreme stress of water shortage, the highest increase in catalase and peroxidase observed in Kimia cultivar without mycorrhiza application and Sepideh cultivar with mycorrhiza application, respectively. Also, Sepideh variety with mycorrhiza application showed the highest reduction in chlorophyll b and total chlorophyll. In total, Sepideh cultivar with the use of mycorrhiza under the conditions of mild stress of water shortage while producing the highest grain yield and crude grain protein, saved irrigation water consumption.

**Keywords**: Antioxidant enzymes, Irrigation cycle, Micronutrient elements, Protein, Seed yield

Corresponding author, Email: rafieemasoud@yahoo.com

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13 ]