

اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی ارقام سورگوم دانه‌ای در کشت تابستانه

معصومه بازگیر^۱، مسعود رفیعی^{۲*} و 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، خرم‌آباد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴)

چکیده

انتخاب رقم سازگار به شرایط تنش خشکی در هر منطقه نقش مهمی در دست‌یابی به پتانسیل تولید در آن منطقه دارد. به این منظور اثر تنش خشکی از طریق دور آبیاری پس از ۸۰ (شاهد)، ۱۱۰ (تنش ملایم)، ۱۴۰ (تنش نسبتاً شدید) و ۱۷۰ (تنش شدید) میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس الف روی چهار رقم سورگوم دانه‌ای؛ سپیده، کیمیا، پیام و KGS32 در کشت تابستانه در خرم‌آباد لرستان بررسی شد. نتایج نشان داد مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b و کلروفیل کل، نسبت کلروفیل a/b، کاروتن و گزانتوفیل) و مقدار نشاسته، پروتئین، سدیم و نسبت سدیم به پتاسیم با تشدید تنش خشکی کاهش یافت، اما مقدار نترات، پرولین و پتاسیم در اندام هوایی سورگوم افزایش نشان داد. تشدید تنش خشکی سرکوب کاتالاز را به همراه داشت، اما موجب عمل کردن مکانیسم دفاع آنتی‌اکسیدانی از طریق افزایش تولید پراکسیداز شد. بیشترین میزان قندهای محلول غیرساختاری، پراکسیداز و پرولین اندام هوایی از ارقام KGS23 و پیام در شرایط تنش شدید خشکی حاصل شد، در حالی که بیشترین مقدار نشاسته در شرایط معمول آبیاری از رقم سپیده و بیشترین مقدار کاتالاز و پروتئین کل اندام هوایی در شرایط معمول آبیاری در ارقام پیام و KGS23 مشاهده شد. روند تغییرات عملکرد دانه همه ارقام سورگوم دانه‌ای تحت تأثیر تنش خشکی از یک رابطه خطی معنی‌دار و منفی پیروی کرد، اما تغییرات پراکسیداز و پرولین با افزایش تنش خشکی یک رابطه خطی معنی‌دار و مثبت داشت. در مجموع، ارقام سورگوم دانه‌ای KGS23 و سپیده با داشتن مکانیسم‌های مختلف تحمل تنش خشکی برای شرایط معمول و تنش در منطقه معتدل خرم‌آباد قابل توصیه‌اند.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، تنظیم اسمزی، دور آبیاری، رنگیزه‌های فتوسنتزی، عملکرد دانه، عناصر ریزمغذی

مقدمه

(Jabereldar *et al.*, 2017). مکانیسم‌های دفاعی متعددی در گیاهان وجود دارد که موجب تحمل به تنش کمبود آب می‌شوند؛ همچون تنظیم اسمزی، هومئوستازی یون، و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی و هورمونی (Mahajan and Tuteja, 2005) که به بقا و رشد گیاهان تحت شرایط محیطی سخت پیش از مرحله رشد زایشی‌شان کمک می‌کنند. تنظیم اسمزی

تنش خشکی را می‌توان به صورت فقدان آب کافی مورد نیاز برای رشد طبیعی و تکمیل چرخه زندگی گیاه تعریف کرد که روی فرایندهای رشد و نمو مؤثر است و به صورت تغییرات بیوشیمیایی، فیزیولوژیک و مورفولوژیک بروز می‌کند

یک فرآیند فیزیولوژیک است که در طی آن گیاه با انباشت یک‌سری مواد اسمزی مانند پرولین و قندهای محلول در سلول‌ها، پتانسیل اسمزی سلول‌ها در بافت‌های تحت تنش خشکی را کاهش می‌دهد تا فشار تورژسانس سلول‌ها در حد مطلوب باقی بماند. با کاهش رطوبت خاک، مقدار پرولین برگ‌ها افزایش می‌یابد که نقش کلیدی در تنظیم اسمزی ایفا می‌نماید (Cha-um and Kirdmanee, 2009). پراکسیدازها در جذب H_2O_2 و پراکسیدازهای آلی که تحت شرایط تنش مختلف تشکیل می‌شوند اهمیت دارند؛ برای مثال، در آزمایشی تنش خشکی موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز، پلی‌فنل اکسیداز و محتوی پرولین شد (خلیل‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶). تنش خشکی موجب ایجاد رادیکال‌های فعال اکسیژن در اثر تنش اکسیداتیو می‌شود که این رادیکال‌ها بر مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی اثر گذاشته و همچنین موجب پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی می‌شوند (امینی و حداد، ۱۳۹۲). تنش خشکی همچنین جذب عناصر غذایی مانند فسفر و پتاسیم، به‌عنوان دو عنصر پرمصرف و مهم در رشد گیاه را کاهش می‌دهد (سیروس‌مهر و روشن‌ضمیر، ۱۳۹۳). کاهش در مقدار فسفر برگ گیاه ریحان با افزایش دور آبیاری از چهار روز به ۱۲ روز (اصلانی و همکاران، ۱۳۹۰) گزارش شده است.

سورگوم پنجمین غله مهم در جهان است و جز غذای اصلی بیش از ۵۰۰ میلیون نفر در بیش از ۳۰ کشور است و چهارمین دانه غذایی در جهان محسوب می‌شود (El Naim *et al.*, 2016; Ahmed *et al.*, 2012). گیاهان متحمل به خشکی، مانند سورگوم، نیازمند به کارگیری مدیریت بهتر در شرایط تغییرات آب‌وهوایی هستند (Menezes *et al.*, 2015). خشکی از نظر شدت، زمان، طول مدت و ارتباطش با دیگر عوامل مانند یخبندان و درجه حرارت بسیار بالا پیچیدگی خاصی در تولید و رشد سورگوم دارد (Assefa and Staggenborg, 2010). سورگوم نسبتاً مقاوم به خشکی بوده و برای رشد و تولید در شرایط تنش خشکی که سایر محصولات غالب مانند ذرت و گندم قادر به زنده ماندن نیستند، سازگار است (Yahaya and Shimelis, 2022). نتایج یک پژوهش ۵۲ ساله

روی سورگوم نشان داد که تنش خشکی مهمترین عامل محدودکننده عملکرد سورگوم در حدود ۳۰ سال از ۵۲ سال مطالعه بود. این نتایج نشان‌دهنده پیچیدگی خشکی از نظر شدت، زمان، طول مدت، و ارتباطش با دیگر عوامل مانند یخبندان و حرارت (درجه حرارت‌های شدید) است (Assefa and Staggenborg, 2010). در بررسی اثر تنش خشکی و درجه حرارت بالا بر ۴۹ هیبرید سورگوم دانه‌ای معلوم شد که رشد و عملکرد تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفت و برخی ژنوتیپ‌ها از کاهش عملکرد کمتری برخوردار بودند (Menezes *et al.*, 2015). خلاصه داده‌های ۳۰ ساله منطقه کنزاس آمریکا نشان داد که سورگوم به کمبود آب در مراحل مشخصی از رشد حساسیت بیشتری دارد (Stone and Schlegel, 2006). سورگوم می‌تواند دوره‌های کوتاه کمبود شدید آب را تحمل کند؛ هر چند، حساسیت سورگوم به تنش خشکی در طول مراحل رشد زایشی نسبت به مرحله رشد رویشی بیشتر بوده و تنش شدید و بلند مدت بر رشد و تولید نهایی سورگوم مؤثر است (Assefa and Staggenborg, 2010). در سطح جهانی معلوم شده است که راندمان مصرف آب سورگوم در شرایط تنش خشکی در اواخر دوره رشد رویشی در مقایسه با شرایط نرمال آبیاری و یا تنش خشکی در اوایل دوره رشد رویشی بالاتر است، که خود نشان‌دهنده بحرانی بودن این مرحله از رشد گیاه است و برای اطمینان از عملکرد و راندمان مصرف آب بهتر بایستی از تنش خشکی در این مرحله اجتناب شود (Tovignan *et al.*, 2023).

یکی از مشکلات اصلی کشور، از جمله استان لرستان، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و حتی خشک‌شدن بسیاری از چاه‌ها در اثر مصرف زیاد آب برای محصولاتی همچون ذرت است. سورگوم دانه‌ای نسبت به ذرت در شرایط کمبود آب از برتری عملکرد و اقتصادی برخوردار است، زیرا تحمل بهتری به خشکی دارد (Stone and Schlegel, 2006). لذا به‌عنوان جایگزین ذرت معرفی شده است (رفیعی، ۱۳۹۳). هدف از اجرای این پژوهش، بررسی اثر تنش خشکی از طریق رژیم آبیاری بر خصوصیات بیوشیمیایی چهار رقم سورگوم دانه‌ای

تیمارهای مختلف تنش خشکی 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 $VW = (FC - \theta) \times BD \times A \times D / Ea$ محاسبه شد که در آن VW، حجم آب آبیاری (مترمکعب)؛ FC، درصد وزنی رطوبت خاک در حالت ظرفیت مزرعه (۲۷ درصد)؛ θ ، درصد وزنی رطوبت خاک در زمان آبیاری؛ BD، وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه (۱/۲۵ 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 شد. 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 گردید. 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. برای سنجش میزان رنگیزه‌ها (Arnon, 1967)، نمونه برگ‌های گیاه پس از توزین، در هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد به خوبی ساییده شد. پس از صاف‌کردن محلول، حجم نهایی با استفاده از استون ۸۰٪ به ۱۵ میلی‌لیتر رسید. برای انجام محاسبات مربوط به تعیین میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل (a+b) برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تازه به ترتیب از روابط زیر استفاده شد:

$$C_a = 0.0127A_{663} - 0.00269A_{645}$$

$$C_b = 0.0229A_{645} - 0.00468A_{663}$$

$$C(a+b) = 0.0202A_{645} + 0.00802A_{663}$$

در روابط فوق، A_{663} و A_{645} به ترتیب میزان جذب در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ با استفاده از اسپکتروفتومتر هستند.

سپیده، کیمیا، پیام و KGS32 در شرایط آب‌وهوایی معتدل خرم‌آباد بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در تابستان سال ۱۳۹۵ در شهرستان خرم‌آباد با ۳۳ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی و ۱۱۷۱ متر ارتفاع از سطح دریا اجرا شد. براساس آمار بلند مدت متوسط حداقل، حداکثر و متوسط حرارت به ترتیب ۹/۲، ۲۵/۲ و ۱۷/۲ درجه سانتی‌گراد دارای اقلیم معتدل با متوسط بارش سالانه ۵۲۵ میلی‌متر و میانگین رطوبت نسبی ۴۶/۷ درصد است. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی به صورت اسپلیت پلات با چهار تکرار اجرا شد. تنش خشکی از طریق رژیم آبیاری پس از ۸۰ (شاهد)، ۱۱۰ (تنش ملایم)، ۱۴۰ (تنش نسبتاً شدید) و ۱۷۰ (تنش شدید) میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس الف (نجفی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸) در کرت‌های اصلی و چهار رقم سورگوم دانه‌ای سپیده، کیمیا، پیام و KGS32 در کشت تابستانه در کرت‌های فرعی قرار گرفتند.

زمین قبل از اجرای آزمایش طی هر دو سال زیر کشت گندم بود. ویژگی‌های خاک مزرعه تا عمق ۳۰ سانتی‌متر در جدول ۱ ارائه شده است. بافت خاک مزرعه، لومی بود. بر اساس نتایج آزمون خاک، نیمی از کود شیمیایی نیتروژن و تمام فسفر براساس آزمون خاک به ترتیب ۱۴۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار و از منبع اوره و سوپرفسفات تریپل در زمان کاشت تأمین 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 شش خط کاشت به طول پنج متر بود. فاصله تکرارها دو متر، بین پلات‌های اصلی دو متر و بین پلات‌های فرعی یک متر در نظر گرفته شد. کاشت در تاریخ دهم تیر ماه انجام شد. تراکم مورد استفاده، ۱۸۰ هزار بوته در هکتار در نظر گرفته شد. وجین علف‌های هرز دو بار به فاصله ۲۰ روز پس از سبز شدن انجام شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عناصر قابل جذب خاک مزرعه

| نیترژن (درصد) | فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم) | پتاسیم (میلی گرم بر کیلوگرم) | هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر سانتی‌متر) | pH | کربن آلی | آهن (میلی گرم بر کیلوگرم) | منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم) | روی (میلی گرم بر کیلوگرم) | مس (میلی گرم بر کیلوگرم) | بافت خاک |
|---------------|----------------------------|------------------------------|---|-----|----------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|----------|
| ۰/۳۱ | ۱۲/۱ | ۳۳۲ | ۱/۲۷ | ۷/۶ | ۰/۹۲ | ۷/۱ | ۶/۲ | ۰/۲۵ | ۰/۷۴ | لومی |

جهت اندازه‌گیری پتاسیم عصاره نمونه‌ها توسط هضم به روش سوزاندن خشک و ترکیب با اسید کلریدریک تهیه گردید و مقدار پتاسیم موجود در عصاره تهیه‌شده به روش نشر شعله‌ای و با کمک دستگاه فلیم‌فتومتر انجام شد.

برای سنجش کربوهیدرات (Nandi et al., 2001) ابتدا یک گرم نمونه خشک با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر الکل ۷۰ درصد به مدت یک هفته در دمای چهار درجه قرار گرفت. بعد از صاف کردن و هموژن کردن نمونه‌ها در ۱۰ میلی‌گرم در لیتر آب مقطر، در بن‌ماری ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. بعد از سانتریفیوژ و جداسازی عصاره آبی، به ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر از عصاره آبی، نیم میلی‌گرم در لیتر الکل، نیم میلی‌گرم در لیتر آب، ۱ میلی‌گرم در لیتر فنل و ۵ میلی‌گرم در لیتر اسید سولفوریک غلیظ اضافه و سپس جذب نوری آنها در ۴۷۰ نانومتر خوانده شد. بعد از رسم منحنی استاندارد، غلظت قندهای محلول مشخص شد. برای سنجش محتویات پروتئین (Lawry et al., 1951)، نمونه‌های خشک در بافر تریس اسید کلریدریک همگن شدند. سپس، نمونه‌ها سانتریفیوژ گردیدند و بعد از برداشتن ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر از محلول بالایی، یک میلی‌لیتر معرف D و سپس ۳ میلی‌لیتر معرف E (فولین) به نمونه‌ها اضافه شد. معرف D ترکیبی از معرف A (کربنات سدیم و سود نیم نرمال)، معرف B (سولفات مس یک درصد) و معرف C (تارتارات سدیم و پتاسیم دو درصد) بود. نمونه‌ها بعد از فرارگرفتن در بن‌ماری در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه، جذب نوری آنها در طول موج ۶۲۵ نانومتر خوانده و با استفاده از منحنی استاندارد، میزان پروتئین دانه مشخص شد.

برای سنجش محتویات نیترژن بعد از هضم شدن نمونه‌ها در بالن ژوژه با اسید سولفوریک، اسید سالیسیلیک و آب اکسیژنه از روش کجکل تک اتوانالیزر استفاده شد. برای سنجش

پروکلین (Bates et al., 1973) ابتدا ۰/۵ گرم از نمونه تر در ۱۰ سی‌سی محلول ۳ درصد اسید سالفوسالسلیک ساییده شد، بعد از صاف کردن محلول، دو میلی‌گرم در لیتر از محلول برداشته و به آن ۲ میلی‌گرم در لیتر معرف نین‌هیدرین و ۲ میلی‌گرم در لیتر اسید استیک خالص اضافه شد، بعد از قراردادن نمونه‌ها در بن‌ماری در دمای ۱۰۰ درجه به مدت یک ساعت، آنگاه ۰/۵ ساعت در حمام یخ قرار گرفتند. سپس ۴ میلی‌گرم در لیتر تولوئن به نمونه‌ها اضافه شده بعد از تکان دادن در طول موج ۵۲۰ نانومتر، جذب لایه رنگی فوقانی خوانده و با استفاده از منحنی استاندارد غلظت پروکلین مشخص شد.

برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز (Mae-Adam and Nelson, 1992)، ابتدا عصاره گیاهی آماده شد. برای تهیه معرف، بافر استات (۲ میلی‌لیتر)، آب اکسیژنه (۰/۲ میلی‌لیتر) و بنزیدین (۰/۲ میلی‌لیتر) در حمام یخ با یکدیگر مخلوط و بلافاصله ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی به آن افزوده شد. با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر، منحنی تغییرات جذب در طول موج ۵۳۰ نانومتر خوانده و فعالیت آنزیمی بر حسب واحد جذب در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین محاسبه شد.

برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز به روش تیتراسیون یا رنگ‌سنجی (Dhindsa et al., 1981)، ابتدا یک میلی‌لیتر از عصاره آنزیمی با ۳۰۰۰ میکرومول بافر فسفات یک دهم مولار با اسیدیته خنثی و ۱۰۰ میکرومول آب اکسیژنه خالص مخلوط شد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک دو درصد به مخلوط بدست آمده اضافه شد و با پرمنگنات پتاسیم یک صدم مولار تا تشکیل رنگ صورتی کم‌رنگ (حداقل ۳۰ ثانیه با رنگ ثابت) تیترا گردید. فعالیت آنزیم کاتالاز بر حسب حجم مصرفی محلول پرمنگنات پتاسیم بر حسب درصد کنترل محاسبه شد. تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار آماری

SAS 9.1 صورت گرفت.

۲۹/۷ درصد) بود (جدول ۳).

نتایج و بحث

رنگیزه‌های فتوستتزی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنها اثر ساده تنش خشکی بر کلروفیل a, b و کلروفیل کل، نسبت کلروفیل a/b، کاروتن و گزانتوفیل معنی‌دار بود (جدول ۲). این نتایج نشان داد که رنگیزه‌های فتوستتزی تحت تأثیر ژنوتیپ قرار نگرفتند؛ به عبارت دیگر، ژنوتیپ‌های اصلاح‌شده مورد استفاده در این آزمایش از مکانیسم فتوستتزی یکسانی برخوردار بودند و واکنش یکسانی به تنش خشکی داشتند.

مقدار رنگیزه‌های فتوستتزی با تشدید تنش خشکی کاهش یافت. میزان کاهش کلروفیل a در شرایط تنش ملایم، شدید و خیلی شدید به ترتیب ۱۲/۰، ۲۸/۲ و ۴۶/۹ درصد؛ کلروفیل b به ترتیب ۱۱/۱، ۲۶/۳ و ۴۰/۲ درصد؛ کلروفیل کل به ترتیب ۱۱/۷، ۲۷/۶ و ۴۵/۰ درصد؛ نسبت کلروفیل a/b به ترتیب ۶/۲، ۶/۴ و ۲/۵ درصد؛ کاروتن به ترتیب ۲۲/۱، ۳۹/۴ و ۵۹/۲ درصد و گزانتوفیل به ترتیب ۱۹/۸، ۳۹/۳ و ۵۹/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد بود (جدول ۳). کاهش در رنگیزه‌های فتوستتزی ناشی از تنش خشکی پیش از این در سورگوم (الفی و عزیز، ۱۳۹۴)، سویا (صادقی و همکاران، ۱۴۰۰) و گندم دیم (رشیدیان و همکاران، ۱۴۰۱) گزارش شده است.

ترکیبات قندی اندام هوایی: براساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، مقدار قندهای محلول غیرساختاری و نشاسته به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش خشکی و اثر متقابل دو گانه تنش خشکی در رقم قرار گرفت. علاوه‌براین، اثر رقم بر مقدار نشاسته معنی‌دار بود. مقدار قندهای محلول غیرساختاری با افزایش تنش خشکی افزایش نشان داد، لیکن مقدار نشاسته کاهش معنی‌داری یافت. افزایش قندهای محلول غیرساختاری در شرایط تنش ملایم، شدید و خیلی شدید به ترتیب ۲۷/۷، ۴۱/۵ و ۷۲/۲ درصد بود؛ اما مقدار نشاسته کاهشی به ترتیب ۱۳/۸، ۲۴/۳ و ۴۰/۰ درصدی داشت (جدول ۳). مقدار نشاسته اندام هوایی در ارقام سپیده و کیمیا بیشترین (به ترتیب ۳۲/۲ و ۳۲/۳ درصد) و در پیام و KGS32 کمترین (به ترتیب ۲۹/۵ و

مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در رقم نشان داد که بیشترین میزان قندهای محلول غیرساختاری اندام هوایی (۰/۱۵۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) بدون تفاوت معنی‌دار از ارقام KGS23 و پیام در شرایط تنش شدید خشکی حاصل شد، درحالی‌که بیشترین میزان نشاسته اندام هوایی (۰/۴۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط معمول آبیاری از رقم سپیده به‌دست آمد. از طرفی، کمترین میزان قندهای محلول غیرساختاری (۰/۶۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) از رقم سپیده در شرایط معمول آبیاری مشاهده شد، اما کمترین میزان نشاسته (۲۲/۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط تنش شدید خشکی از رقم KGS23 بدون تفاوت معنی‌دار با سایر ارقام بدست آمد (شکل ۱- A و B). در مجموع ارقام سورگوم دانه‌ای واکنش متفاوتی به سطوح مختلف تنش خشکی از نظر میزان قندهای محلول غیرساختاری و نشاسته نشان دادند. به عبارت دیگر، تغییرات میزان نشاسته و قندهای محلول غیرساختاری تحت تأثیر هر دو عامل ژنتیک و محیط قرار گرفت.

در شرایط تنش کم آبی، گیاهان مقدار کربوهیدرات‌های محلول در آب مانند گلوکز، فروکتوز و ساکارز را جهت تنظیم اسمزی افزایش می‌دهند (خاکشور مقدم و همکاران، ۱۳۹۰؛ Debaeke and Aboudrare, 2004). تجمع ساکارز و قند باعث تقویت عملکرد حفاظت‌کننده‌های اسمزی می‌شود که در واقع به‌دنبال آن موجب ثبات غشای سلولی و حفظ فشار تورگر می‌گردد (Emami Bistgani et al., 2017).

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مقدار پراکسیداز و کاتالاز اندام هوایی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش خشکی و اثر متقابل دو گانه تنش خشکی در رقم قرار گرفت (جدول ۲). مقدار پراکسیداز اندام هوایی در شرایط تنش ملایم، شدید و خیلی شدید افزایشی به ترتیب ۵/۸، ۱۸/۲ و ۴۲/۱ درصدی داشت؛ اما مقدار کاتالاز اندام هوایی کاهشی به ترتیب ۷/۸، ۱۴/۷ و ۲۳/۵ درصدی نشان داد (جدول ۳).

مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در رقم نشان داد که بیشترین میزان پراکسیداز اندام هوایی بدون تفاوت معنی‌دار

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

| میانگین مربعات | | | | | | | | درجه آزادی | منابع تغییرات |
|----------------|--------------|------------|---------|-------------|------------|------------|------------|------------|----------------|
| نشاسته | قندهای محلول | گزارنتوفیل | کاروتن | کلروفیل a/b | کلروفیل کل | کلروفیل b | کلروفیل a | | |
| ۱۱/۹۵ | ۸۹۶/۴ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۲۱** | ۰/۰۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۰۰۵۳ | ۰/۰۰۰۰۰۲۱ | ۰/۰۰۰۰۰۳۶ | ۳ | تکرار |
| ۹۴۶/۹۷** | ۲۰۳۴/۷** | ۰/۹۸** | ۰/۶۱۰** | ۰/۰۰۰۱۸** | ۰/۰۰۰۰۲۹** | ۰/۰۰۰۰۵۳** | ۰/۰۰۰۰۳۲** | ۳ | تنش خشکی |
| ۳۵/۷۴ | ۴۶۱/۳ | ۰/۰۰۰۳۴ | ۰/۰۰۰۸۳ | ۰/۰۰۰۰۴۱ | ۰/۰۰۰۰۰۲۳ | ۰/۰۰۰۰۰۴۴ | ۰/۰۰۰۰۰۱۱ | ۹ | خطای ۱ |
| ۴۲/۶۳** | ۲۱۵۳۶۰ | ۰/۰۰۰۲۱ | ۰/۰۰۰۱۵ | ۰/۰۰۰۰۲۳ | ۰/۰۰۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۰۰۶۴ | ۰/۰۰۰۰۰۳۸ | ۳ | رقم |
| ۱۲۳/۰۷** | ۱۲۳۶۵** | ۰/۰۰۰۳۵ | ۰/۰۰۰۵۱ | ۰/۰۰۰۰۳۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۶۵ | ۰/۰۰۰۰۰۳۲ | ۰/۰۰۰۰۰۳۲ | ۹ | تنش خشکی × رقم |
| ۱۴/۱۵ | ۳۱۵/۸ | ۰/۰۰۰۲۴ | ۰/۰۰۰۲۹ | ۰/۰۰۰۰۱۱ | ۰/۰۰۰۰۰۳۱ | ۰/۰۰۰۰۰۶۲ | ۰/۰۰۰۰۰۳۴ | ۳۶ | خطای ۲ |
| ۹/۵ | ۱۲/۷ | ۱۱/۹ | ۸/۷۶ | ۹/۷ | ۱۵/۳ | ۷/۱ | ۸/۸ | درصد | ضریب تغییرات |

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

ادامه جدول ۲-

| میانگین مربعات | | | | | | | | درجه آزادی | منابع تغییرات |
|----------------|---------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|------------|----------------|
| پتاسیم/سدیم | پتاسیم | سدیم | پرولین | پروتئین | نیترات | کاتالاز | پراکسیداز | | |
| ۰/۰۰۰۱۴ | ۰/۲۳** | ۰/۰۰۱۲۳** | ۰/۰۰۴۴ | ۰/۰۰۷۶ | ۰/۰۰۰۴۲** | ۰/۰۰۴۵* | ۰/۰۰۷۴* | ۳ | تکرار |
| ۰/۰۰۰۱** | ۸/۶** | ۰/۲۴** | ۰/۰۰۷** | ۰/۰۲۳۶** | ۰/۰۹۸** | ۰/۰۳۲۴** | ۰/۰۲۱۲** | ۳ | تنش خشکی |
| ۰/۰۰۰۰۳۶ | ۱/۳۷ | ۰/۰۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۰۶۳ | ۰/۰۰۰۰۶۴ | ۹ | خطای ۱ |
| ۰/۰۰۰۰۰۱۶ | ۰/۹۸ | ۰/۰۰۰۰۲۵ | ۰/۰۰۰۲۵ | ۰/۰۰۰۰۱۴ | ۰/۰۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۹۱ | ۰/۰۰۰۰۳۳ | ۳ | رقم |
| ۰/۰۰۰۰۰۰۵۲ | ۰/۹۵۱** | ۰/۰۰۰۰۹۱* | ۰/۰۱۱۷** | ۰/۰۳۱** | ۰/۰۰۰۰۰۳ | ۰/۰۲۴۵** | ۰/۰۱۵۹** | ۹ | تنش خشکی × رقم |
| ۰/۰۰۰۰۰۰۹۶ | ۰/۲۱۵ | ۰/۰۰۰۰۵۲ | ۰/۰۰۰۰۱۴ | ۰/۰۰۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۰۲۴ | ۰/۰۰۰۰۴۱ | ۳۶ | خطای ۲ |
| ۶/۷ | ۴/۷ | ۵/۳ | ۶/۷ | ۹/۷ | ۸/۵ | ۱۰/۷ | ۸/۷ | درصد | ضریب تغییرات |

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

خشکی از نظر میزان کاتالاز نشان دادند.

آنتی‌اکسیدان‌ها به‌طور مؤثری آسیب‌های حاصل از اکسیداسیون ایجاد شده توسط رادیکال‌های آزاد را کاهش و یا متوقف می‌کنند و از این طریق به سلامت سلول‌ها کمک می‌کنند (بیات و سپهری، ۱۳۹۳). تلفیقی از فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، گلوتامین ردوکتاز (GR)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD) عامل مهمی در تحمل به تنش‌های محیطی در گیاهان مختلف است (Jithesh et al., 2006). بین ژنوتیپ‌های لوبیا، سطوح تنش و اثرات متقابل آنها از لحاظ تغییرپذیری فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز تفاوت مشاهده شد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۷).

از ارقام پیام و KGS23 (به ترتیب ۰/۱۹۵ و ۰/۱۹۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط تنش شدید خشکی به‌دست آمد، در صورتی‌که، بیشترین میزان کاتالاز اندام هوایی در شرایط معمول آبیاری از ارقام پیام و KGS23 بدون تفاوت معنی‌دار با یکدیگر (به ترتیب ۰/۲۴۸ و ۰/۲۴۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد. همچنین، کمترین میزان پراکسیداز (۰/۱۲۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در رقم سپیده در شرایط معمول آبیاری مشاهده شد، ولی کمترین میزان کاتالاز (۰/۱۷۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط تنش شدید خشکی در رقم کیمیا مشاهده شد (شکل ۲- C و D). در مجموع ارقام سورگوم دانه‌ای واکنش متفاوتی به سطوح مختلف تنش

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات بیوشیمیایی اندام هوایی سورگوم

| تیماها | کلروفیل a | کلروفیل b | کلروفیل کل | نسبت کلروفیل a/b | کاروتن | گزانتوفیل | قندهای محلول | نشاسته | | |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | | | | | | | (میلی گرم بر گرم وزن تر) | (میلی گرم بر گرم وزن خشک) |
| تنش ۸۰ | ۰/۰۱۵۹ ^a | ۰/۰۰۶۵ ^a | ۰/۰۲۲۵ ^a | ۲/۶۴۱ ^a | ۰/۲۶۷ ^a | ۰/۸۵۱ ^a | ۸۱/۵۵ ^c | ۳۸/۴۲ ^a | | |
| خشکی ۱۱۰ | ۰/۰۱۴ ^b | ۰/۰۰۵۸ ^b | ۰/۰۱۹۸ ^b | ۲/۴۷۶ ^b | ۰/۲۰۸ ^b | ۰/۶۸۲ ^{ab} | ۱۰۴/۱۱ ^{bc} | ۳۳/۱۱ ^b | | |
| (میلی متر تبخیر) ۱۴۰ | ۰/۰۱۱ ^c | ۰/۰۰۴۸ ^c | ۰/۰۱۶۲ ^c | ۲/۴۷۲ ^b | ۰/۱۶۲ ^c | ۰/۵۱۶ ^{bc} | ۱۱۵/۴۰ ^{ab} | ۲۹/۰۶ ^c | | |
| ۱۷۰ | ۰/۰۰۸ ^d | ۰/۰۰۳۹ ^d | ۰/۰۱۲۳ ^d | ۲/۵۷۶ ^c | ۰/۱۰۹ ^d | ۰/۴۶۱ ^c | ۱۴۰/۴۰ ^a | ۲۳/۰۶ ^d | | |
| سپیده | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱۷ | ۲/۴۷۰ | ۰/۱۸۸ | ۰/۶۲۷ | ۹۴/۹۸۴ | ۳۲/۱۸ ^a | | |
| رقم | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱۷ | ۲/۴۹۴ | ۰/۱۹۰ | ۰/۶۳۳ | ۱۰۵/۸۸۶ | ۳۲/۲۷ ^a | | |
| پیام | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱۸ | ۲/۵۹۵ | ۰/۱۹۱ | ۰/۶۳۸ | ۱۱۹/۱۸۲ | ۲۹/۴۸ ^b | | |
| KGS32 | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱۸ | ۲/۶۰۸ | ۰/۱۷۹ | ۰/۶۱۴ | ۱۲۱/۴۱۷ | ۲۹/۷۳ ^b | | |

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۰/۰۵ هستند.

ادامه جدول ۳-

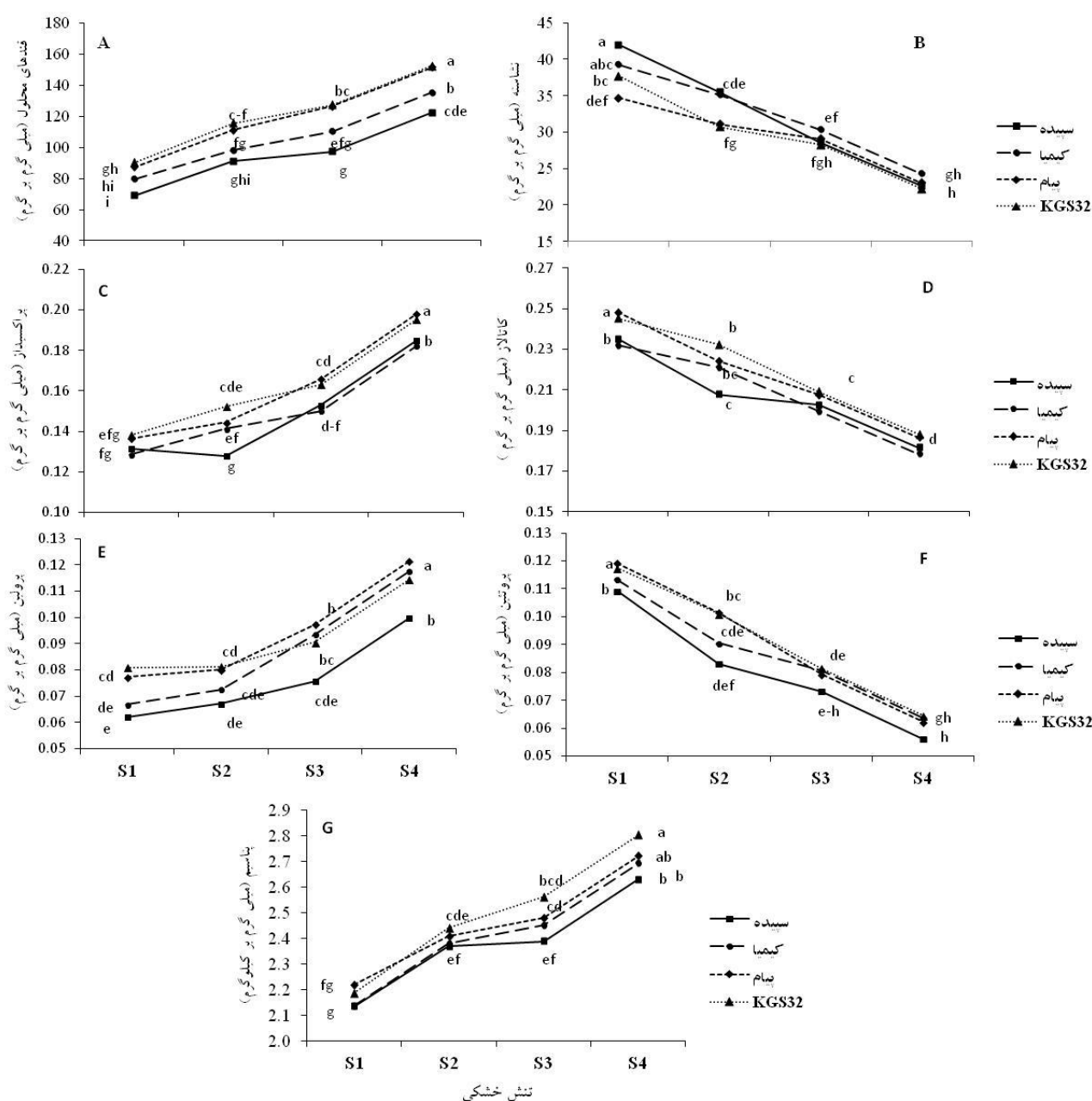
| تیماها | پراکسیداز | کاتالاز | پرویلین | نیترات | پروتئین | سدیم | پتاسیم | پتاسیم/سدیم | | |
|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | | | | | | | (میلی گرم بر گرم وزن تر) | (میلی گرم بر گرم وزن خشک) |
| تنش خشکی ۸۰ | ۰/۱۳۳ ^c | ۰/۲۴۰ ^a | ۰/۰۷۱ ^c | ۰/۱۲۴ ^c | ۰/۱۱۴ ^a | ۰/۴۹۶ ^a | ۲/۱۶۹ ^c | ۰/۲۲۹ ^a | | |
| (میلی متر تبخیر) ۱۱۰ | ۰/۱۴۱ ^{bc} | ۰/۲۲۱ ^b | ۰/۰۷۵ ^c | ۰/۱۳۵ ^{bc} | ۰/۰۹۴ ^b | ۰/۴۲۴ ^b | ۲/۳۹۹ ^{bc} | ۰/۱۷۷ ^{ab} | | |
| ۱۴۰ | ۰/۱۵۸ ^b | ۰/۲۰۴ ^c | ۰/۰۸۹ ^b | ۰/۱۵۰ ^b | ۰/۰۷۸ ^c | ۰/۳۳۶ ^c | ۲/۴۷۰ ^{ab} | ۰/۱۳۶ ^{bc} | | |
| ۱۷۰ | ۰/۱۹۰ ^a | ۰/۱۸۳ ^d | ۰/۱۱۳ ^a | ۰/۱۷۸ ^a | ۰/۰۶۱ ^d | ۰/۲۷۵ ^d | ۲/۷۱۰ ^a | ۰/۱۰۲ ^c | | |
| سپیده | ۰/۱۴۹ | ۰/۲۰۷ | ۰/۰۷۶ | ۰/۱۴۹ | ۰/۰۸۰ | ۰/۳۹۳ | ۲/۳۸۰ | ۰/۱۶۹ | | |
| رقم | ۰/۱۵۰ | ۰/۲۰۸ | ۰/۰۸۸ | ۰/۱۴۸ | ۰/۰۸۷ | ۰/۳۹۵ | ۲/۴۱۵ | ۰/۱۶۷ | | |
| پیام | ۰/۱۶۱ | ۰/۲۱۷ | ۰/۰۹۴ | ۰/۱۴۹ | ۰/۰۹۱ | ۰/۳۸۱ | ۲/۴۵۶ | ۰/۱۵۹ | | |
| KGS32 | ۰/۱۶۲ | ۰/۲۱۹ | ۰/۰۹۲ | ۰/۱۴۷ | ۰/۰۹۱ | ۰/۳۶۶ | ۲/۴۹۸ | ۰/۱۵۱ | | |

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۰/۰۵ هستند.

مقدار نیترات به ترتیب ۸/۲، ۲۰/۵ و ۴۲/۹ درصد افزایش؛ مقدار پروتئین به ترتیب ۱۸/۱، ۳۱/۵ و ۴۶/۳ درصد کاهش و مقدار پرویلین به ترتیب ۴/۹، ۲۴/۶ و ۵۸/۱ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳). همانند ترکیبات قندی، در ترکیبات نیتروژنه نیز مشاهده شد با تشدید تنش خشکی از کمپلکس پروتئین کاسته شده و بر ترکیبات ساده تر نیترات و پرویلین جهت بکارگیری مکانیسم تنظیم اسمزی در مواجهه با تنش خشکی افزوده شده است.

مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در رقم نشان داد که بیشترین میزان پرویلین اندام هوایی (۰/۱۲۱ میلی گرم بر گرم

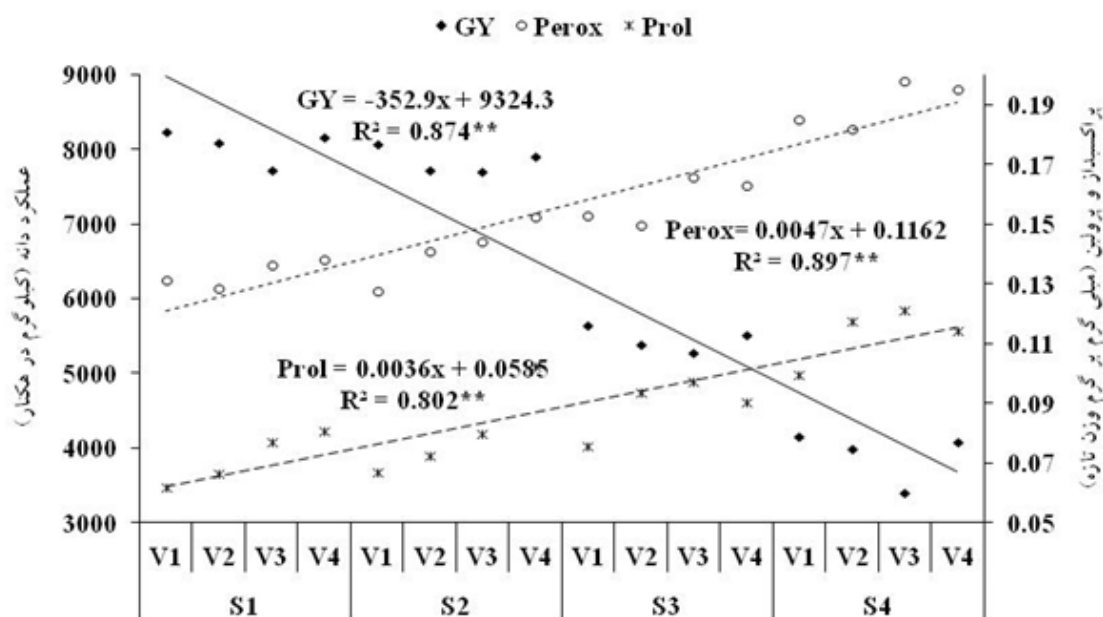
افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در سطوح مختلف خشکی و یا وجود برهمکنش میان ژنوتیپ و محیط در سویا (صادقی و همکاران، ۱۴۰۰) و ذرت (رفیعی، ۱۳۹۳) گزارش شده است. خلیل‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) دریافتند که محدودیت آبیاری موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز و محتوی پرویلین در گیاه گندم شد. ترکیبات نیتروژنه: تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر مقدار نیترات، پروتئین و پرویلین اندام هوایی و اثر متقابل دو گانه تنش خشکی در رقم تأثیر معنی‌داری بر پروتئین و پرویلین داشت (جدول ۲). در شرایط تنش ملایم، شدید و خیلی شدید



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه رژیم آبیاری (S) در رقم بر برخی صفات بیوشیمیایی اندام هوایی سورگوم دانه‌ای. S1، S2، S3 و S4: به ترتیب تنش خشکی از طریق رژیم آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشک تبخیر کلاس الف. میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

مشاهده شد. کمترین میزان پروتئین (۰/۰۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) از رقم سپیده در شرایط معمول آبیاری به‌دست آمد و کمترین میزان پروتئین کل (۰/۰۵۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط تنش شدید خشکی از رقم سپیده مشاهده شد (شکل ۲- E و F).

وزن تر) از رقم پیام و بدون تفاوت معنی‌دار با ارقام کیمیا و KGS23، در شرایط تنش شدید خشکی به‌دست آمد، درحالی‌که بیشترین میزان پروتئین کل اندام هوایی در شرایط معمول آبیاری از ارقام پیام و KGS23 بدون تفاوت معنی‌دار با یکدیگر (به ترتیب ۰/۱۱۹ و ۰/۱۱۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)



شکل ۲- روند تغییرات عملکرد دانه (GY)، پراکسیداز (Perox) و پرولین (Prol) سورگوم دانه‌ای در سطوح مختلف اثر متقابل رژیم آبیاری × رقم. S1، S2، S3 و S4: به ترتیب رژیم آبیاری از طریق آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس الف؛ V1 الی V4: به ترتیب ارقام سپیده، کیمیا، پیام و KGS32

خشکی در رقم نشان داد که بیشترین میزان پتاسیم اندام هوایی (۲/۸۰۲ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) از رقم KGS23 در شرایط تنش شدید خشکی به دست آمد و کمترین میزان پتاسیم (۲/۱۳۵ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) از رقم سپیده در شرایط معمول آبیاری مشاهده شد (شکل ۲-G). در مجموع، ارقام سورگوم دانه‌ای واکنش متفاوتی به سطوح مختلف تنش خشکی از نظر میزان پتاسیم نشان دادند.

کاهش جذب عناصر در اندام هوایی در اثر تنش خشکی توسط رفیعی و همکاران (۱۳۸۲) در ذرت و غلامی و همکاران (۱۴۰۱) در کلزا گزارش شده است، اما افزایش جذب پتاسیم در شرایط تنش خشکی را می‌تواند ناشی از رقابت میان عناصر (رفیعی، ۱۳۹۳) باشد. کاهش در جذب عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف از خاک و رقابت میان آنها در آویشن باغی (Sharafi et al., 2019) و سویا (صادقی و همکاران، ۱۴۰۰) گزارش شده است.

روند تغییرات عملکرد دانه، پراکسیداز و پرولین: روند تغییرات عملکرد دانه سورگوم دانه‌ای تحت تأثیر متقابل تنش

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 (حشمتی و همکاران، ۱۳۹۵). از آنجایی که مقادیر پرولین توسط تعادل بین بیوستز و کاتابولیسم تعیین می‌شود، لذا کاهش مصرف پرولین نیز در شرایط تنش از دلایل تجمع آن در گیاه است، به طوری که توقف در اکسایش پرولین در پتانسیل‌های آب پایین اتفاق می‌افتد (Jain et al., 2016).

یون‌ها: اثر تنش خشکی بر مقدار یون‌های سدیم، پتاسیم و نسبت پتاسیم/سدیم و اثر متقابل دو گانه تنش خشکی در رقم بر مقدار پتاسیم معنی‌دار بود (جدول ۲). در شرایط تنش ملایم، شدید و خیلی شدید مقدار سدیم به ترتیب ۱۴/۵، ۳۲/۲ و ۴۴/۵ درصد کاهش؛ مقدار پتاسیم به ترتیب ۱۰/۶، ۱۳/۹ و ۲۴/۹ درصد افزایش و نسبت پتاسیم/سدیم به ترتیب ۲۲/۷، ۴۰/۳ و ۵۵/۵ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). افزایش جذب پتاسیم می‌تواند به منظور حفظ فشار تورژسانس در شرایط تنش خشکی صورت گرفته باشد. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش

بر خلاف عملکرد دانه، روند تغییرات پراکسیداز و پرولین تحت تأثیر متقابل سطوح رژیم آبیاری در رقم نشان داد که مقدار این دو عامل مؤثر در مکانیسم دفاعی، با افزایش تنش خشکی از یک رابطه خطی معنی‌دار و مثبت (به ترتیب $R^2 = 0.897^{**}$ و $R^2 = 0.802^{**}$) پیروی نمود (شکل ۲). هر چند مقدار پراکسیداز و پرولین در ارقام متفاوت بود (نقاط واقعی)، لیکن میزان فعالیت‌شان در همه ارقام با افزایش تنش خشکی زیاد شد (شکل ۲).

نتایج تحقیقات مختلف نیز حاکی از افزایش پراکسیداز و پرولین (حشمتی و همکاران، ۱۳۹۵) و کاهش عملکرد دانه در گیاه سورگوم (Ahmed et al., 2016; Jabereldar et al., 2017) با تشدید تنش خشکی است، که با یافته‌های حاصل از این پژوهش مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که با تشدید تنش خشکی، فعالیت آنزیم پراکسیداز و مقدار قندهای محلول، پرولین و پتاسیم افزایش یافت؛ اما مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی، نشاسته، پروتئین و در نهایت عملکرد دانه گیاه سورگوم دانه‌ای کاهش نشان داد. در میان ارقام، رقم پیام به دلیل زودرسی از کمترین کاهش عملکرد در سطوح تنش خشکی و کمترین عملکرد دانه برخوردار بود. در مجموع، رقم سپیده در شرایط تنش خشکی ملایم، از مکانیسم‌های دفاعی مناسب در مواجهه با تنش خشکی و عملکرد دانه بالاتر برخوردار بود که برای مناطق با شرایط آب‌وهوایی معتدل همچون خرم‌آباد قابل توصیه است.

خشکی در رقم نشان داد که عملکرد دانه کلیه ارقام با افزایش تنش خشکی از یک رابطه خطی معنی‌دار و منفی ($R^2 = 0.874^{**}$) پیروی نمود (شکل ۲). تنش خشکی ناشی از رژیم‌های آبیاری ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر موجب کاهش عملکرد به ترتیب ۲/۵، ۳۲/۲ و ۵۱/۵ درصدی نسبت به آبیاری معمول (رژیم آبیاری ۸۰ میلی‌متر تبخیر) شد (شکل ۲). در میان ارقام، بیشترین مقدار عملکرد دانه در کلیه سطوح تنش خشکی به رقم سپیده و کمترین آن به رقم پیام تعلق داشت. به عبارت دیگر، عامل رقم مستقل از تنش خشکی بود. کمترین کاهش عملکرد دانه ناشی از تنش خشکی در رژیم‌های آبیاری ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر متعلق به رقم پیام (به ترتیب ۰/۱۹، ۳۱/۷ و ۴۷/۲ درصد) و بیشترین کاهش عملکرد دانه به رقم کیمیا (به ترتیب ۴/۴، ۳۳/۳ و ۵۰/۶ درصد) تعلق داشت (شکل ۲). رقم پیام علی‌رغم کمترین کاهش عملکرد در سطوح تنش خشکی، از کمترین عملکرد دانه برخوردار بود؛ که علت آن زودرسی این رقم نسبت به ارقام دیگر است. عموماً ارقام زودرس از عملکرد کمتری نسبت به ارقام دیررس برخوردارند و چون مدت زمانی که در معرض تنش قرار می‌گیرند کوتاه‌تر است، خسارت کمتری از تنش خشکی می‌بینند (Rafiee and Kalhor, 2015). از سوی دیگر، به دلیل کاهش غیرمعنی‌دار عملکرد ارقام در شرایط تنش خشکی ملایم ناشی از رژیم آبیاری ۱۱۰ میلی‌متر تبخیر نسبت به شرایط معمول رطوبتی، مشخص شد که با اعمال تنش ملایم خشکی می‌توان سورگوم را تولید و موجب صرفه‌جویی در آب مصرفی شد (رفیعی، ۱۳۹۳).

منابع

- اصلانی، زهرا، حسنی، عباس، رسولی صدقیانی، میرحسن، سفیدکن، فاطمه، و برین، محسن (۱۳۹۰). تأثیر دو گونه قارچ آربوسکولار مایکوریزا (*Glomus mosseae* L.) و (*Glomus intraradices* L.) بر رشد، مقادیر کلروفیل و جذب فسفر در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) تحت شرایط تنش خشکی. *تحقیقات گیاهان داوربی و معطر ایران*، ۲۷(۳)، ۴۸۶-۴۷۱. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2011.6388>
- الفی، شهرام، و عزیزی، فرهاد (۱۳۹۴). بررسی اثر تنش خشکی و استفاده از ژنولیت بر برخی صفات کمی و کیفی سه رقم ذرت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

- امینی، زهرا، و حداد، رحیم (۱۳۹۲). نقش رنگیزه‌های فتوستتزی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در مقابل تنش اکسیداسیون. *مجله پژوهش‌های سلولی و مولکولی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۲۶ (۳)، ۲۵۱-۲۶۵. DOR: 20.1001.1.23832738.1392.26.3.2.7
- بیات، سمیه، و سپهری، علی (۱۳۹۳). اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و پاکلوبوترازول بر عملکرد دانه و انتقال مجدد ماده خشک ذرت در شرایط تنش خشکی. *مجله تحقیقات غلات*، ۴، ۱۲۷-۱۳۹. DOR: 20.1001.1.22520163.1393.4.2.4.0
- 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>
- حیدری، مریم، طالعی، علی‌رضا، و عباسی، علی‌رضا (۱۳۹۷). بررسی تأثیر تنش خشکی بر مؤلفه‌های جوانه‌زنی و فعالیت آنزیم‌های پاداکسنده در ژنوتیپ‌های لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.). *مجله علوم گیاهان زراعی ایران*، ۴۹ (۱)، ۲۷-۱۱. <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2017.209308.654148>
- خاکشور مقدم، زهرا، لاهوتی، مهرداد، و گنجعلی، علی (۱۳۹۰). بررسی اثرات تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن گلیکول بر جوانه‌زنی و خصوصیات مورفولوژیکی گیاه شوید (*Anthum graveolens* L.). *نشریه علوم باغبانی*، ۲۵ (۲)، ۱۹۳-۱۸۵. <https://doi.org/10.22067/jhort4.v1390i0.9989>
- خلیل‌زاده، راضیه، سید شریفی، رئوف، و جلیلیان، جلال (۱۳۹۶). تأثیر سایکلوسل و تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد، شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و برخی صفات فیزیولوژیک گندم در شرایط محدودیت آبی. *فرایند و کارکرد گیاهی*، ۶ (۲۱)، ۲۴۷-۲۶۶. DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.2.4
- رشیدیان، امین، رفیعی، مسعود، خورگامی، علی، میردریگوند، رضا، و وفایی، سیدحسین (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
- رفیعی، مسعود، کریمی، محمد مهدی، نورمحمدی، قربان، و نادیان، حبیب‌اله (۱۳۸۲). اثرات تنش خشکی، مقادیر فسفر و روی بر توزیع عمودی سطح برگ، نفوذ نور در سایه‌انداز و رابطه آنها با عملکرد دانه ذرت. *مجله علوم زراعی ایران*، ۵ (۱)، ۳۵-۲۲. <https://civilica.com/doc/1481997>
- رفیعی، مسعود (۱۳۹۳). ذرت (مجموعه مقالات - جلد اول). انتشارات سروا، تهران.
- سیروس مهر، علی‌رضا، و روشن ضمیر، فاطمه (۱۳۹۳). تأثیر تنش کم آبی و کود فسفر بر روی برخی از خصوصیات فیزیولوژیک و درصد اسانس ریحان (*Ocimum basilicum* L.). *نشریه زراعت پژوهش و سازندگی*، ۱۰۵، ۱۳۴-۱۴۰. <https://doi.org/10.22092/AJ.2014.103362>
- صادقی، لیلی، رفیعی، مسعود، و دانشیان، جهانفر (۱۴۰۰). اثرات تنش خشکی و ریزگرد بر عملکرد و برخی خصوصیات فیزیولوژیک در گیاه سویا (*Glycine max* L.). *نشریه فرآیند و کارکردهای گیاهی*، ۱۰ (۴۱)، ۲۶۳-۲۷۷. DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.16.6
- غلامی، مسعود، کوچک‌زاده، احمد، سیادت، عطاء‌اله، مرادی تلاوت، محمدرضا، و رفیعی، مسعود (۱۴۰۱). سنجش محتوای عناصر غذایی ارقام مختلف کلزا (*Brassica napus* L.) تحت تأثیر ازتوباکتر و آبیاری. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۳ (۱)، ۳۸-۲۷. <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2020.311630.654762>
- نجفی‌نژاد، حبیب، راوری، سید ذبیح‌اله، و جواهری، محمدعلی (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، ۵۳۵-۵۵۴. <https://doi.org/10.30495/JCEP.2020.671172>
- 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>
- Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, 112-121. <https://www.ijrsr.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>
- 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>
- Cha-um, S. & Kirdmanee, Ch. (2009). Proline accumulation, photosynthetic abilities and growth characters of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) plantlets in response to iso-osmotic salt and water-deficit stress. *Agricultural Sciences in China*, 8(1), 51-58. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60008-0](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60008-0)
- Debaeke, P. & Aboudrare, A. (2004). Adaptation of crop management to water limited environments. *European Journal of Agronomy*, 21, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.07.006>
- 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?>
- El Naim, A. M., Baldu, M. A. M., & Zaied, M. M. B. (2012). Effect of tillage depth and pattern on growth and yield of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) under rain-fed. *Journal of Novel Applied Sciences*, 1(3), 68-73. <https://www.researchgate.net/publication/235764798>
- Emami Bistgani, Z., Siadat, S. A., Bakhshandeh, A., Ghasemi Pirbalouti, A., & Hashemi, M. (2017). Interactive effects of drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of *Tymus daenesis* Celak. *The Crop Journal*, 5, 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.04.003>
- 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>
- Jain, S., Yue-Lioang, R., Mei-wang, L. E., Ting-Xian, Y., Xiao-Wen, Y., & HongVing, Z. (2016). Effect of drought stress on sesame growth and yield characteristics 514 and comprehensive evaluation of drought tolerance. *Chinese Journal of Oil Crops Sciences*, 4, 42-48. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131361587>
- 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>
- Lawry, O. H., Rosebrough, N. J., & Rand, R. J. (1951). Protein measurement with the folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193, 265-273. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14907713/>
- 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>
- Mahajan, S. & Tuteja, N. (2005). Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Archives in Biochemistry and Biophysics*, 444, 139-158. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.10.018>
- Menezes, C. B., Saldanha, D. C., Santos, C. V., Andrade, L. C., Mingote Julio, 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>
- Nandi, et al. (2001). High temperature induced free proline accumulation in *Gracilavia tenuistipitata* (Rhodophta). *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 40, 289-294. <https://ejournal.sinica.edu.tw/bbas/content/1999/4/bot404-06.html>
- Rafiee, M. & Kalhor, M. (2015). Economic water use efficiency of corn (*Zea mays* L.) hybrids as affected by irrigation regimes: A case study in West Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1476-3567. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1105360>
- Sharafi, Gh. A., Changizi, M., Rafiee, M., Gomarian, M., & Khagani, Sh. (2019). Investigating the effect of drought stress and vermicompost biofertilizer on morphological and biochemical characteristics of *Thymus vulgaris* L. *Archives of Pharmacy Practice*, 10(3), 137-145. <https://archivepp.com/issue/archiveapp-vol10-iss3>
- Stone, L. R. & Schlegel, A. J. (2006). Yield-water supply relationship of grain sorghum and winter wheat. *Agronomy Journal*, 98, 1359-1366. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0042>
- Tovignan, T. K., Basha, Y., Augustine, S. M., & Vukasovic, S. (2023) Precision phenotyping of agro-physiological responses and water use of sorghum under different drought scenarios. *Agronomy*, 13(3), 722. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030722>
- Yahaya, M. A., & Shimelis, H. (2022). Drought stress in sorghum: Mitigation strategies, breeding methods and technologies—A review. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(2), 127-148. <https://doi.org/10.1111/jac.12573>

Effect of drought stress on the biochemical characteristics of grain sorghum cultivars in summer cultivation

Masoomeh Bazgir¹, Masoud Rafiee^{2*}, Ali Khorgami¹

¹Department 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: 2023/03/27, Accepted: 2023/09/05)

Abstract

Selection of cultivars adapted to drought stress conditions in each region plays an important role in achieving production potential in that region. For this purpose, the effect of drought stress through the irrigation cycle after 80 (control), 110 (mild stress), 140 (relatively severe stress) and 170 (severe stress) mm of evaporation from the class A evaporation pan on four grain sorghum cultivars, Sepideh, Kimia, Payam and KGS32, was investigated in summer cultivation in Khorramabad, Lorestan. The results showed that the amount of photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll, ratio of chlorophyll a/b, carotene and xanthophyll) and the amount of starch, protein, sodium and the ratio of sodium to potassium decreased with the intensification of drought stress, but the amount of nitrate, proline and potassium increased in the sorghum shoot. Intensification of drought stress was accompanied by the suppression of catalase, which caused the antioxidant defense mechanism to work through increasing peroxidase production. The highest amounts of non-structural soluble sugars, peroxidase and proline in the aerial part were obtained from KGS23 and Payam cultivars under severe drought stress conditions, while the highest amount of starch under normal irrigation conditions was obtained from the Sepideh variety, as were the highest amounts of catalase and total protein in the aerial part under normal conditions. Watering was observed in Payam and KGS23 cultivars. The trend of grain yield changes of all grain sorghum cultivars under the influence of drought stress followed a significant and negative linear relationship, but the changes of peroxidase and proline with increasing drought stress had a significant and positive linear relationship. In general, grain sorghum cultivars KGS23 and Sepideh have different drought stress tolerance mechanisms and can be recommended for normal and stressful conditions in the temperate region of Khorramabad.

Keywords: Antioxidant, Irrigation regime, Micronutrient elements, Osmotic adjustment, Photosynthetic pigments, Seed yield

Corresponding author, Email: rafieemasoud@yahoo.com