بررسی اثر تنش کم‌آبی بر شاخص‌های فتوسنتزی و عملکرد علوفه ژنوتیپ‌های سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor*)

معصومه قهرمانی[۱]، علی عبادی[۲]، قاسم پرمون*[۳] و سدابه جهانبخش[۴]

۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲) دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳) دانشجوی دکتری گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۴) استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

* **نویسنده مسئول:** Ghasem.parmoon@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۱۰ **تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۱۱**

چکیده

با توجه به محدودیت دسترسی به آب در تولید گیاهان زراعی یافتن ژنوتیپ‌های با کارایی مطلوب مصرف آب از اولویت‌های پژوهشی به حساب می‌آید. به همین منظور این پژوهش جهت بررسی اثر تنش کم‌آبی بر شاخص‌های فتوسنتزی و در نهایت تولید و عملکرد علوفه‌ای سه ژنوتیپ سورگوم در دانشگاه محقق اردبیلی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه تحقیقاتی در سال ۱۳۹۲ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل تنش کم‌آبی در چهار سطح (۸۰، ۶۵، ۴۵ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و سه ژنوتیپ سورگوم (KFS2، KFS6 و KFS17) بود. نتایج نشان داد که اثر اصلی تنش کم‌آبی و ژنوتیپ بر اکثر صفات اندازه‌گیری شده در سطح احتمال یک درصد دارای اختلاف معنی‌دار بود. برهمکنش تنش کم‌آبی و ژنوتیپ سورگوم تنها بر میزان کلروفیل a، کارتنوئیدها، پایداری کلروفیل و عملکرد علوفه‌ای معنی‌دار گردید. به‌طوری‌که تنش کم‌آبی موجب کاهش کلروفیل a، b، کلروفیل کل، فلورسانس حداکثر (F_m)، عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (Fv/F_m) و عملکرد علوفه و سبب افزایش نسبت کلروفیل a به b، کارتنوئیدها، پایداری کلروفیل، F_O (فلئورسانس حداقل در شرایط سازگار شده با تاریکی)، F_t (شدت فلورسانس پایه یا لحظه‌ای) گردید. اگرچه ژنوتیپ KFS6 در بسیاری از صفات اندازه‌گیری شده بیش‌ترین مقدار را داشت با این وجود بیش‌ترین عملکرد مربوط به ژنوتیپ KFS2 و بعد از آن KFS17 بود. هم‌چنین بر اساس نتایج تجزیه رگرسیونی ژنوتیپ KFS17 بیش‌ترین همبستگی را بین کلروفیل a، کلروفیل کل و میزان کارتنوئیدها با عملکرد نشان داد. به‌طورکلی، کاهش عملکرد در ژنوتیپ KFS2 می‌تواند به هزینه کردن بیش‌تر مواد فتوسنتزی گیاه به‌منظور تحمل در برابر تنش باشد.

واژه‌های کلیدی: رنگدانه‌های فتوسنتزی، فلورسانس کلروفیل، تنش کم‌آبی.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

مقدمه

سورگوم (*Sorghum bicolor*) گیاهی یک‌ساله متعلق به خانواده گرامینه یا پوآسه است. این گیاه از غلات عمده برای کشاورزی دیم در مناطق نیمه‌گرمسیری است. به دلیل تحمل فوق‌العاده سورگوم به شرایط نامساعد محیطی، در قسمت‌های وسیعی از جهان کشت می‌شود، از پتانسیل تولید بالایی برخوردار است و با شرایط آب و هوایی ایران به‌ویژه مناطق گرم و خشک و معتدل سازگاری خوبی دارد (Thakur and Sharma, 2005). در بسیاری از مناطق دنیا، گیاهان در طول دوره رشد و نمو با تنش‌های مختلف زنده و غیرزنده مواجه می‌شوند. کم‌آبی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزنده در تولید محصولات زراعی در سراسر جهان به‌ویژه کشورهای در حال توسعه و مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آید و اثر متعددی در سیستم‌های کشاورزی و تولید غذا دارد (Smith and Fredriksen, 2000). اصلاح ژنتیکی برای افزایش تحمل خشکی موضوع بسیار مهمی در اصلاح نباتات بوده و تشخیص و ارزیابی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی، فرآیندی بسیار سخت و زمان‌بر است. تحمل خشکی یک ویژگی بسیار پیچیده بوده و سازوکارهای ژنتیکی و فیزیولوژیکی مربوط به آن نیز به خوبی شناخته نشده است. واکنش گیاهان به خشکی مجموعه‌ای از تغییرات ژنتیکی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی از قبیل بیان ژن، تجمع پروتئین‌های اختصاصی، تغییر غلظت یون‌ها و آنزیم‌ها و ترکیبات متابولیک و بسته شدن روزنه‌ها را شامل می‌گردد (Fukai and Cooper, 1995). تنش کم‌آبی یکی از مهم‌ترین موانع محیطی در برابر فتوسنتز است. بسیاری از مطالعات در رابطه با تنش خشکی کاهش در میزان فتوسنتز را نشان می‌دهد. از عوامل اثرگذار در میزان فتوسنتز برگ می‌توان به نقش کلروفیل‌ها اشاره کرد. محتوای کلروفیل برگ‌ها یکی از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک می‌باشد، به‌طوری‌که از غلظت کلروفیل برگ به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی قدرت منبع یاد می‌شود و کاهش مقدار آن در شرایط تنش آبی می‌تواند به‌عنوان عامل محدودکننده در کاهش کارایی فتوسنتزی برگ به حساب آید (Majumdar *et al.,* 1991; Ghosh *et al.,* 2004). فتوسنتز که یکی از فرآیندهای مهم فیزیولوژیک گیاه است، سرعت آن در شرایط کم‌آبی کاهش می‌یابد (Gusegnova *et al.,* 2006). دوام فتوسنتز و حفظ کلروفیل برگ در شرایط تنش از جمله شاخص‌های فیزیولوژیک متحمل به تنش است. تنش خشکی باعث تولید اکسیژن فعال همراه با کاهش و تجزیه کلروفیل می‌شود. در طی تنش، کلروفیل‌ها در کلروپلاست تجزیه و ساختارهای تیلاکوئید آسیب می‌بینند (Sairam *et al.,* 1998). گزارش شده است که قدرت گیاه در حفظ فتوسنتز، محتوای نسبی آب برگ و ظرفیت فتوسنتزی می‌تواند از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مقاومت به خشکی باشد (Sajjadinia *et al.,* 2010). بارزترین واکنش‌های گیاهان به عوامل تنش‌زای محیطی افت فتوسنتز ناشی از اختلال در فعالیت فتوسیستم II می‌باشد. جهت ارزیابی اثر تنش خشکی بر سیستم فتوسنتزی گیاه از پارامترهای فلورسانس کلروفیل نیز می‌توان استفاده کرد. فلورسانس کلروفیل اطلاعاتی را در

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

مورد وضعیت فتوسیستم II در اختیار ما قرار می‌دهد (Fracheboud, 2006). جریان الکترون در فتوسیستم شاخصی برای میزان کلی فتوسنتز می‌باشد و اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل تخمینی از نحوه عمل فتوسنتز را امکان‌پذیر می‌سازد. در واقع بررسی وضعیت فتوسنتز یک معیار قابل اعتماد برای ارزیابی میزان سازگاری گیاهان نسبت به محیط اطرافشان می‌باشد. مقدار عملکرد کوانتومی نشان‌دهنده بیشینه کارایی کوانتومی فتوسیستم II و معیاری از نحوه عملکرد فتوسنتز گیاهی است (Fracheboud, 2006). از این رو در ژنوتیپ‌های مختلف مقدار کاهش عملکرد کوانتومی و یا تغییرات فلورسانس در بازه‌ی زمانی به‌عنوان معیاری از درجه تحمل و مقاومت به تنش مورد استفاده قرار گرفته است (عشقی‌زاده و احسان‌زاده، ۱۳۸۸). Premachandra و همکاران (۱۹۹۲) در بررسی روند فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل در گیاهان لوبیای تحت تنش و آبیاری مجدد شده اعلام کردند عدم دسترسی به آب در روزهای اول بعد از تنش، کاهش چندانی در فتوسنتز، تعرق و هدایت روزنه‌ای نداشت ولی با افزایش مدت زمان تنش کاهش شدیدی در فتوسنتز، تعرق و هدایت روزنه‌ای ایجاد می‌کند. علت کاهش فتوسنتز و تعرق در طی تنش، افزایش تولید اسیدآبسیسیک (ABA) و بسته شدن روزنه در این مدت گزارش شده است. تنش کم‌آبی هم‌چنین سبب کاهش عملکرد علوفه می‌شود به‌طوری‌که موسوی و همکاران (۱۳۸۸) بیان کردند که کاهش میزان آبیاری تا حد اعمال تنش شدید و تنش متوسط عملکرد علوفه خشک را به‌ترتیب ۶۲/۶ و ۱۵/۵ درصد نسبت به تیمار بدون تنش کاهش داد. Singh و Singh (۱۹۹۵) در بررسی واکنش سورگوم، ذرت و ارزن مرواریدی به آبیاری مشاهده کردند که با افزایش شدت تنش، فتوسنتز خالص در هر سه گونه کاهش یافت و عملکرد ماده خشک نیز به‌طور معنی‌داری تحت اثر آبیاری قرار گرفت. در همین رابطه کهن‌مو و مظاهری (۱۳۸۲) در بررسی اثر فواصل آبیاری بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای به این نتیجه رسیدند که فواصل آبیاری ۷ و ۱۲ روز نسبت به فواصل آبیاری ۱۷ و ۲۲ روز باعث افزایش معنی‌دار عملکرد شد. هدف از این پژوهش بررسی اثر تنش کم‌آبی بر واکنش‌های فتوسنتزی، کارایی کوانتومی فتوسیستم II و در نهایت عملکرد علوفه ژنوتیپ‌های سورگوم بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه‌ای با موقعیت جغرافیای ۳۸/۲۵ شمالی ۴۸/۳۰ شرقی در ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح دریا در دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۲ اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل تنش کم‌آبی در چهار سطح (۸۰، ۶۵، ۴۵ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و سه ژنوتیپ‌های سورگوم (KFS2، KFS6 و KFS17) بود. در این پژوهش تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی به‌عنوان شرایط عدم تنش و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی به‌عنوان تنش شدید در نظر گرفته شد. بذور ژنوتیپ‌های سورگوم علوفه‌ای از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر مرکز کرج تهیه شد که ژنوتیپ KFS2 به‌عنوان ژنوتیپ حساس، ژنوتیپ KFS6 به‌عنوان نیمه‌متحمل و ژنوتیپ

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

KFS17 به‌عنوان متحمل معرفی شده بود. برای اجرای این طرح از گلدان‌های به وزن ۱۰ کیلوگرم استفاده شد. بذور پس از ضدعفونی درون گلدان که با خاک لومی که نتایج آنالیز آن در جدول ۱ آمده است پر شده بود، کشت و ظرفیت زراعی خاک به روش وزنی تعیین گردید. تیمارهای تنش کم‌آبی در مرحله چهار الی پنج برگی شدن اعمال شد. به منظور آبیاری، گلدان‌ها هر بار وزن شده و با آب به حد ظرفیت زراعی مورد نظر رسانده شد. نمونه‌برداری لازم برای اندازه‌گیری صفات مورد نظر در طول فصل رشد انجام گرفت. جهت آبیاری، گلدان‌ها روزی سه مرتبه (صبح، ظهر و شب) توزین و با آب به حد ظرفیت زراعی مورد نظر رسانده شد. میزان کودهای شیمیایی NPK به‌ترتیب ۹۰، ۵۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار برای هر گلدان محاسبه و مقدار آن اضافه گردد.

جدول ۱: نتایج تجزیه خاک مورد استفاده در آزمایش

شوری (دسی‌زیمنس بر متر)	pH	کربن آلی (درصد)	میزان عناصر قابل‌جذب (پی.پی.ام.)			درصد ذرات خاک			بافت خاک
			نیتروژن	فسفر	پتاسیم	رس	سیلت	شن	
۰/۶۲۵	۷/۸۸	۰/۶۲	۰/۰۶	۸/۵	۱۷۰	۲	۱۴	۸۴	لومی

میزان سبزینگی بعد از اعمال تیمارهای آبیاری، با دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD-502، مینولتای ژاپن) انجام شد. برای سنجش کلروفیل از بافت تازه برگی استفاده شد. در این روش ۰/۱ گرم از بافت برگ را با استن ۸۰ درصد به تدریج له کرده تا کلروفیل وارد محلول استن شده و در نهایت حجم محلول با استن ۸۰ درصد به ۲۰ میلی‌لیتر رسانده شد. محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰ دور سانتریفوژ شد و سپس جذب نوری محلول رویی (روشناور) در طول موج‌های ۶۴۶/۸، ۴۷۰ و ۶۶۳/۲ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد. مقدار کلروفیل و کارتنوئیدها طبق رابطه‌های زیر محاسبه شد (Arnon, 1967). و هم‌چنین شاخص پایداری کلروفیل[1] (CSI) مطابق با روش Sairam و همکاران (۱۹۹۷) و بر اساس رابطه‌های زیر محاسبه گردید:

رابطه ۱: $Chl_a = 12.25\ A_{663.2} - 2.798\ A_{646.8}$

رابطه ۲: $Chl_b = 21.50\ A_{646.8} - 5.10\ A_{663.2}$

رابطه ۳: $Chl_{Total} = C_a + C_b$

رابطه ۴: $Carotenoid_x = (1000\ a_{470} - 1.82\ C_a - 85.02 C_b)/\ 198$

رابطه ۵: $CSI = (\text{Total Chl under stress}/\text{Total Chl under control}) \times 100$

برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل از انتهایی‌ترین برگ کاملاً توسعه یافته استفاده شد. این کار با استفاده از دستگاه Chlorophyll Fluorometer مدل Optic Science- OS-30 USA اندازه‌گیری شد. در شرایط گلخانه‌ای با استفاده از گیره‌های مخصوص برگ گیاهان به مدت ۲۰ دقیقه با تاریکی سازگار شده و سپس میزان فلورسانس تیمارها در شدت نور

[1] The Chlorophyll Stability Index

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

۱۰۰۰ میکرو مول (فوتون) بر مترمربع در ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. F_v/F_m میزان عملکرد کوانتومی فتوسیستم II مطابق فرمول ذیل محاسبه شد (Arnon, 1949):

رابطه ۶: $F_v / F_m = (F_m - F_O)/ F_m$

F_m، میزان فلورسانس حداکثر، بعد از تابیدن یک پالس نور اشباع بر روی گیاه سازگار شده به تاریکی، F_O، میزان فلورسانس بعد از آن‌که روی گیاه سازگار شده به تاریکی یک پرتو تعدیل شده و ضعیف تابیده شد و مقدار F_t، شدت فلورسانس پایه یا لحظه‌ای می‌باشد. برای تعیین عملکرد علوفه‌ای پنج بوته از هر گلدان انتخاب و پس از جدا کردن اندام‌های مختلف آن‌ها را در آونی که قبلاً دمای آن روی ۷۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم و راه‌اندازی شده بود، به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت. تجزیه رگرسیونی با استفاده از Minitab و رسم نمودارها با استفاده از Excel انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کم‌آبی در سطح احتمال یک درصد بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، نسبت کلروفیل a به b و اثر اصلی ژنوتیپ در سطح احتمال پنج درصد بر میزان کلروفیل a و نسبت کلروفیل a به b و در سطح احتمال یک درصد بر کلروفیل b، کلروفیل کل، نسبت کلروفیل a به b دارای اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۲). برهمکنش کم‌آبی در ژنوتیپ تنها بر میزان کلروفیل a در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که تنش موجب کاهش میزان کلروفیل‌ها و افزایش نسبت کروفیل a به b شد (جدول ۳). مقایسه میانگین برهمکنش در مورد کلروفیل a نشان داد بیش‌ترین میزان کلروفیل a (۱/۰۷ میلی‌گرم در گرم بافت برگ) در تیمار ۸۵ درصد ظرفیت زراعی (شاهد) و در ژنوتیپ KFS2 و کم‌ترین (۰/۶۰ میلی‌گرم در گرم بافت برگ) میزان آن در تنش ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و در ژنوتیپ KFS17 مشاهده شد (جدول ۴). هم‌چنین نتایج نشان داد که حداکثر مقدار کلروفیل b و کلروفیل کل (به‌ترتیب ۰/۵۵ و ۱/۵۶ میلی‌گرم در گرم بافت برگی) در ۸۵ درصد ظرفیت زراعی و حداقل مقدار (به‌ترتیب ۰/۴۱ و ۱/۱۷ میلی‌گرم در گرم بافت برگی) در تنش ۲۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای مشاهده شد. این در حالی بود که بیش‌ترین نسبت کلروفیل a به b از تنش ۲۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای به‌دست آمد. در بین ژنوتیپ‌ها KFS6 بیش‌ترین میزان کلروفیل b و کلروفیل کل و ژنوتیپ KFS2 بالاترین نسبت کلروفیل a به b را به خود اختصاص داد (جدول ۳). نتایج این پژوهش با یافته‌های درویشی‌بلوچی و همکاران (۱۳۸۹) و Mohsenzade و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

جدول ۲: نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده چند ژنوتیپ سورگوم تحت تنش کم‌آبی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات										
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	نسبت کلروفیل a به b	کارتنوئیدها	پایداری کلروفیل[1]	شاخص سبزینگی	F_0	F_m	F_t	F_v/F_m	عملکرد علوفه‌ای
کم‌آبی	۳	۰/۱۳۲۹**	۰/۰۳۴۵**	۰/۲۹۲۷**	۲/۴۳**	۹۹/۴۷۲**	۱۲۰۵/۰۴**	۴۹۷/۳۱**	۳۸۸۹/۶**	۱۳۰۳۹/۷**	۶۷۳۸۴/۶۸**	۰/۰۷۹۲**	۱/۰۱۳**
ژنوتیپ	۲	۰/۰۱۸۳*	۰/۰۴۰۱**	۰/۱۱۳۱**	۰/۱۹۸*	۱۰/۶۷۶**	۱۴۲/۴۳**	۶۳/۶۴۶**	۲۵۴۶/۳**	۴۴۳۸۳/۰۵**	۲۶۲۶۷/۵۲**	۰/۰۱۱۴**	۰/۲۳۱**
کم‌آبی× ژنوتیپ	۶	۰/۰۰۸۲*	۰/۰۰۴۸^{ns}	۰/۰۱۹۱^{ns}	۰/۰۲۵^{ns}	۱/۲۰۹**	۳۸/۸۸۵**	۴/۷۳۸^{ns}	۱۳۲/۰۸^{ns}	۲۶۰۷/۰۵^{ns}	۱۰۱۲/۶۰^{ns}	۰/۰۰۱۶۷^{ns}	۰/۰۷۲*
خطا	۲۴	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۸۲	۰/۰۵۷	۰/۲۴۱	۶/۴۷۵	۱/۹۵۲	۱۹۷/۸	۲۷۲۳/۲	۲۳۹۸/۴۴	۰/۰۰۱۰	۰/۰۲۴
ضریب تغییرات	-	۶/۳۲	۱۰/۶۳	۶/۴۱	۱۲/۲۳	۳/۱۶۹	۳/۰۹۳	۴/۳۲	۱۲/۰۳	۱۱/۶۱	۱۲/۲	۴/۱۶	۱۷/۰۳۱

ns، * و **: به‌ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

۱- در این آزمایش پایداری کلروفیل به علت وارد نشدن تیمار شاهد (بدون تنش کم‌آبی) درجه آزادی آن با بقیه صفات متفاوت می‌باشد و درجه آزادی آن برای کم‌آبی= ۲، ژنوتیپ =۲، کم‌آبی × ژنوتیپ =۴ و خطا =۱۸ می‌باشد.

جدول ۳: نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی صفات اندازه‌گیری شده چند ژنوتیپ سورگوم تحت تنش کم‌آبی

تیمار	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	نسبت کلروفیل a به b	کارتنوئیدها	پایدرای کلروفیل	شاخص سبزینگی	عملکرد علوفه‌ای (گرم وزن خشک)	F_0	F_t	F_m	F_v/F_m
	(میلی‌گرم بر گرم وزن تر)											
تنش کم‌آبی												
۸۵ درصد	۱/۰۴±۰/۰۱	۰/۵۳±۰/۰۲	۱/۵۶±۰/۰۶	۱/۵۵±۰/۰۵	۱۴/۳۳±۰/۲۴	۱۴/۳۳±۰/۲۴	۳۷/۶۲±۱/۵	۱/۰۴±۰/۱۳	۸۸/۲۲±۷/۱	۲۹۰/۳۹±۱۸/۳۶	۵۹۶/۸۹±۳۲/۸	۰/۸۵±۰/۰۱
۶۵ درصد	۱/۰۰±۰/۰۲	۰/۵۵±۰/۰۳	۱/۵۴±۰/۰۳	۱/۷۱±۰/۰۵	۱۴/۹۸±۰/۳۱	۱۴/۹۸±۰/۳۱	۳۷/۶۱±۰/۴	۰/۵۵±۰/۰۴	۱۱۶/۱۶±۵/۱	۳۸۸/۰۰±۲۰/۹۷	۴۷۱/۷۶±۲۱/۴	۰/۷۵±۰/۰۲
۴۵ درصد	۰/۹۲±۰/۰۱	۰/۴۹±۰/۰۲	۱/۴۰±۰/۰۵	۱/۸۵±۰/۰۳	۱۶/۰۹±۰/۴۷	۱۶/۰۹±۰/۴۷	۲۸/۶۶±۰/۷	۰/۴۴±۰/۰۳	۱۲۶/۹۱±۷/۳	۴۱۰/۲۸±۲۱/۰۳	۴۲۱/۵۲±۲۲/۸	۰/۶۹±۰/۰۲
۲۵ درصد	۰/۷۶±۰/۰۴	۰/۴۱±۰/۰۱	۱/۱۷±۰/۰۳	۲/۷۱±۰/۰۴	۱۸/۸۱±۰/۳۸	۱۸/۸۱±۰/۳۸	۲۴/۹۴±۰/۳	۰/۲۶±۰/۰۲	۱۳۶/۲۲±۴/۱	۵۰۱/۱۱±۱۹/۸۶	۳۰۶/۴۲±۱۷/۱	۰/۵۴±۰/۰۳
LSD(۰/۰۵)	۰/۰۵۷	۰/۰۵۰	۰/۰۸۷	۰/۲۳۲	۰/۸۰۲	۳/۲۶	۱/۴۳	۰/۱۵	۱۳/۶۸	۴۷/۶۴	۵۰/۷۷	۰/۰۴۱
ژنوتیپ												
KFS2	۰/۹۲±۰/۰۳	۰/۴۵±۰/۰۲	۱/۳۷±۰/۰۵	۲/۰۹±۰/۱۶	۱۵/۸۸±۰/۶۵	۱۵/۸۸±۰/۶۵	۳۰/۱۴±۱/۶	۰/۷۲±۰/۱۴	۱۲۴/۴۷±۵/۹	۴۴۷/۲۵±۲۵/۳۹	۳۸۱/۵۵±۲۸/۴	۰/۶۴±۰/۰۴
KFS6	۰/۹۷±۰/۰۲	۰/۵۶±۰/۰۲	۱/۵۳±۰/۰۵	۱/۸۳±۰/۱۵	۱۶/۶۸±۰/۵۶	۱۶/۶۸±۰/۵۶	۳۴/۳۹±۲/۰	۰/۴۵±۰/۰۷	۱۲۶/۰۸±۵/۲	۳۵۴/۴۲±۲۸/۹۴	۴۹۹/۴۴±۴۱/۹	۰/۷۲±۰/۰۳
KFS17	۰/۸۹±۰/۰۴	۰/۴۷±۰/۰۲	۱/۳۶±۰/۰۶	۱/۹۴±۰/۱۴	۱۵/۶۰±۰/۵۴	۱۵/۶۰±۰/۵۴	۳۲/۱۰±۱/۶	۰/۵۵±۰/۰۸	۱۰۰/۰۸±۸/۲	۳۹۰/۶۷±۲۳/۰۵	۴۶۶/۴۴±۳۱/۷	۰/۷۷±۰/۰۳
LSD(۰/۰۵)	۰/۰۴۹	۰/۰۴۳	۰/۰۷۶	۰/۲۰۱	۰/۶۹۴	۳/۲۶	۱/۲۴	۰/۱۳	۱۱/۸۵	۴۱/۲۶	۴۳/۹۷	۰/۰۳۵۵

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.20084403.1394.7.25.5.0]

بیش‌تر مطالعات نشان داده است که تحت شرایط تنش خشکی کاهش میزان فتوسنتز با اختلال در واکنش‌های بیوشیمیایی همراه است، فتوسیستم II (PS_{II}) بسیار حساس به عوامل بازدارنده محیطی بوده و تنش خشکی موجب خسارت به مرکز واکنش PS_{II} می‌شود (Oncel *et al.*, 2000). هم‌چنین افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز طی تنش کم‌آبی می‌تواند عامل کاهش میزان کلروفیل‌ها در طی تنش باشد (Ranjan *et al.*, 2001).

جدول ۴: نتایج مقایسه میانگین برهمکنش ژنوتیپ در تنش کم‌آبی برخی صفات اندازه‌گیری شده

تیمارهای آزمایشی		کلروفیل a	کارتنوئیدها	شاخص پایداری	شاخص	عملکرد علوفه‌ای
تنش کم‌آبی	ژنوتیپ	(میلی‌گرم بر گرم)	(میلی‌گرم بر گرم)	کلروفیل	سبزینگی	(گرم)
	KFS2	۱/۰۳±۰/۰۰۹	۱۲/۳۴±۰/۳۲	-	۳۳/۲۹±۰/۶۶	۱/۴۴±۰/۱۵۰
۸۵ درصد	KFS6	۱/۰۵±۰/۰۱۸	۹/۱۰±۰/۱۸	-	۴۲/۹۹±۱/۲۵	۰/۷۲±۰/۲۱۵
	KFS17	۱/۰۳±۰/۰۰۶	۱۱/۷۰±۰/۳۵	-	۳۶/۵۸±۱/۵۷	۰/۹۶±۰/۰۶۰
	KFS2	۱/۰۳±۰/۰۱۲	۱۵/۵۱±۰/۳۱	۹۴/۲۵±۲/۱۰	۳۷/۰۷±۰/۷۶	۰/۶۴±۰/۱۰۱
۶۵ درصد	KFS6	۱/۰۲±۰/۰۳۵	۱۴/۳۷±۰/۳۱	۹۵/۱۷±۲/۵۵	۳۸/۴۳±۱/۱۰	۰/۴۵±۰/۰۳۹
	KFS17	۰/۹۴±۰/۰۳۸	۱۵/۵۵±۰/۲۹	۹۱/۱۵±۱/۱۸	۳۷/۳۴±۰/۴۳	۰/۵۶±۰/۰۱۰
	KFS2	۰/۸۹±۰/۰۱۲	۱۷/۹۸±۰/۰۱	۸۲/۸۳±۱/۱۰	۲۵/۹۷±۰/۷۶	۰/۴۹±۰/۰۳۰
۴۵ درصد	KFS6	۰/۹۳±۰/۰۲۳	۱۶/۴۶±۰/۲۸	۸۴/۹۱±۲/۵۵	۳۰/۲۸±۰/۵۶	۰/۳۹±۰/۰۸۰
	KFS17	۰/۹۴±۰/۰۲۷	۱۶/۵۹±۰/۳۰	۸۰/۷۲±۰/۷۱	۲۹/۷۳±۰/۵۶	۰/۴۵±۰/۰۵۳
	KFS2	۰/۷۴±۰/۰۲۹	۱۹/۶۸±۰/۲۸	۷۵/۲۲±۰/۳۳	۲۴/۲۵±۰/۷۴	۰/۳۲±۰/۰۲۱
۲۵ درصد	KFS6	۰/۸۷±۰/۰۴۷	۱۸/۰۸±۰/۴۲	۷۴/۸۱±۰/۳۶	۲۵/۸۵±۰/۴۵	۰/۲۳±۰/۰۲۹
	KFS17	۰/۶۰±۰/۰۷۰	۱۸/۷۳±۰/۱۵	۶۱/۱۷±۰/۳۷	۲۴/۷۳±۰/۵۸	۰/۲۱±۰/۰۴۲
LSD (۰/۰۵)	-	۰/۰۹۸	۱/۳۸	۵/۶۴	۲/۴۹	۰/۲۶

اثر اصلی کم‌آبی و ژنوتیپ در سطح احتمال یک درصد بر پایداری کلروفیل معنی‌داری بود. هم‌چنین برهم‌کنش کم‌آبی در ژنوتیپ نیز در سطح احتمال یک درصد بر این شاخص اثر معنی‌دار داشت (جدول ۲). مقایسه برهم‌کنش تیمارها نشان داد، تنش موجب کاهش پایداری کلروفیل‌ها شد به‌طوری‌که بیش‌ترین پایداری کلروفیل (۹۴ درصد) در ژنوتیپ KFS2 و در ۶۵ درصد ظرفیت زراعی و حداقل این شاخص در ژنوتیپ KFS17 و در تنش شدید به‌دست آمد (جدول ۴). این نتایج با یافته‌های Terzi و Kadioglu (۲۰۰۶) مطابقت دارد. تنش کم‌آبی با افزایش رادیکال‌های آزاد و هم‌چنین افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز موجب کاهش میزان کلروفیل و پایداری آن‌ها در طی تنش شد.

اثر کم‌آبی بر تغییرات میزان کارتنوئیدها در ژنوتیپ‌های سورگوم در سطح احتمال یک درصد یکسان نبود (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش نشان داد که با افزایش شدت کم‌آبی میزان کارتنوئیدها افزایش یافت، به‌طوری‌که حداکثر مقدار کارتنوئیدها (۱۹/۶۸ میلی‌گرم در گرم) در ژنوتیپ KFS2 و در تنش شدید ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و حداقل مقدار کارتنوئیدها (۹/۱۰ میلی‌گرم در گرم) در سطح شاهد (بدون تنش) و در ژنوتیپ KFS6 به‌دست آمد. میزان کارتنوئیدها در تنش ۲۵ درصد ظرفیت زراعی در ژنوتیپ‌های KFS2 و KFS17 نسبت به شاهد ۳۷ درصد افزایش داشت (جدول ۳). کارتنوئیدها می‌توانند سیستم دریافت نور دستگاه فتوسنتزی را از گزند مولکول‌های اکسیژن رادیکال حفاظت نمایند. آن‌ها هم‌چنین می‌توانند مستقیماً اکسیژن یکتایی را خاموش و غیرفعال کنند و یا به‌وسیله اکسیژن یکتایی اکسید شوند. بنابراین

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

کارتنوئیدها به‌طور غیرمستقیم تولید گونه‌های اکسیژن را کاهش می‌دهند. هم‌چنین کارتنوئیدها از طریق سازوکاری که چرخه زانتوفیل نامیده می‌شود باعث مصرف NADPH و حفاظت از کلروفیل در مقابل فتواکسیداسیون می‌شوند (Koyro, 2006)؛ بنابراین افزایش آن در طی تنش می‌تواند راه‌کاری برای مقاومت به تنش باشد.

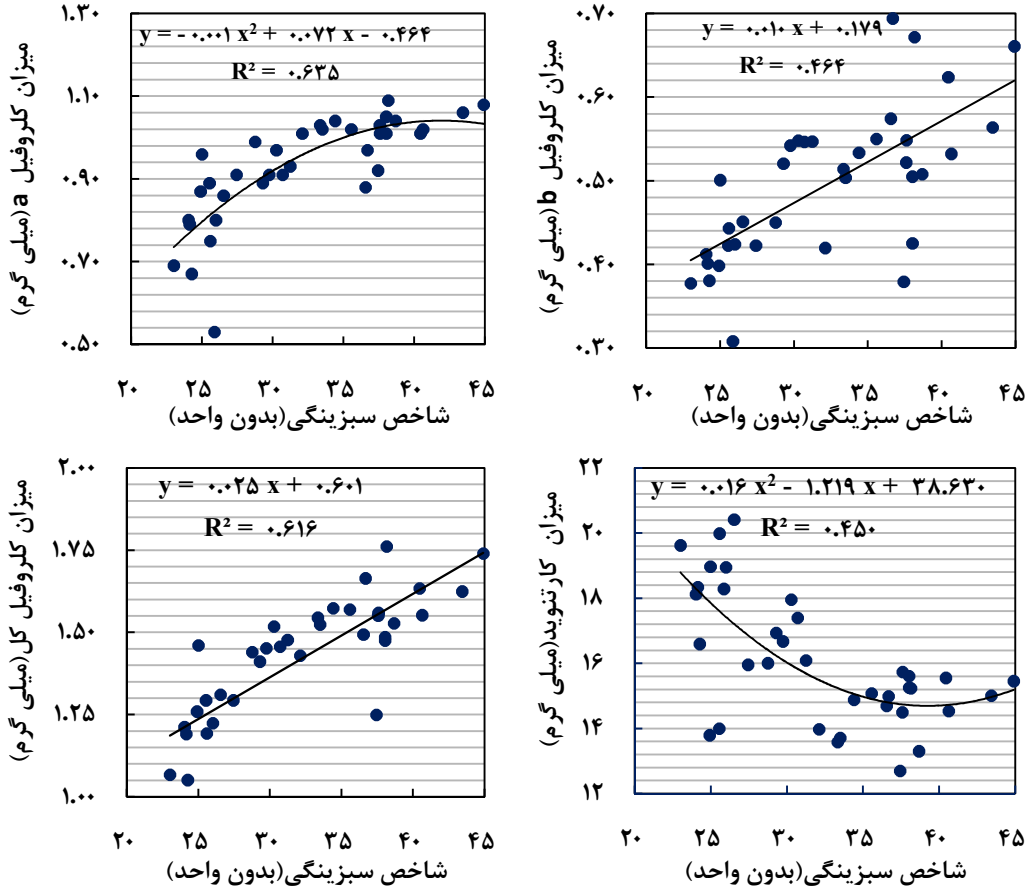
تنش کم‌آبی بر میزان محتوای کلروفیل برگ در ژنوتیپ‌های مختلف سورگوم اثر گذاشت (α=٪۱). از نتایج مقایسه میانگین‌های برهمکنش چنین استنباط می‌شود که عدد کلروفیل‌متر ژنوتیپ KFS2 در تیمار ۸۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای بیش‌تر از سه تیمار دیگر آبیاری بود، به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان سبزینگی در سطح شاهد و کم‌ترین میزان این شاخص در ژنوتیپ KFS6 و در تنش شدید (۲۵ درصد ظرفیت زراعی) به‌دست آمد. در واقع محتوای کلروفیل برگ و پایداری غشای سیتوپلاسمی به افزایش سطوح تنش خشکی واکنش نشان داد، به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار کلروفیل و بیش‌ترین نشت یونی مربوط به تیمار تنش شدید بود. پژوهشگران دیگر نیز به کاهش میزان سبزینگی در شرایط تنش خشکی اشاره کرده‌اند (Paknejad *et al.,* 2007). شاخص سبزینگی تخمینی از غلظت کلروفیل را نشان می‌دهد. شکل ۱ نشان داد تغییرات شاخص سبزینگی با میزان کلروفیل b و کلروفیل کل از نوع خطی و با میزان کلروفیل a و کارتنوئیدها از نوع درجه دوم بود. با توجه به نتایج مشاهده شد شاخص سبزینگی بالاترین سهم را در پیش‌بینی میزان کلروفیل a دارد و تغییرات آن از نوع خطی است. طبق معادله رگرسیون رسیدن شاخص سبزینگی به ۴۵ واحد موجب رسیدن میزان کلروفیل a به ۰/۹۸، کلروفیل b به ۰/۶۲۰، کلروفیل کل به ۱/۷۴ و کارتنوئیدها به ۱۵/۱۴ میلی‌گرم بر لیتر می‌شود (شکل ۱). محتوای کلروفیل برگ یکی از عوامل کلیدی در تعیین فتوسنتز و تولید ماده خشک می‌باشد (Ghosh *et al.,* 2004).

در شرایط تنش کم‌آبی فاکتورهای لازم برای سنتز کلروفیل کاهش و تخریب آن افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، در شرایط تنش کم‌آبی، گیاه با بسته نگاه داشتن روزنه‌ها در طی روز، سعی در حفظ محتوای آب نسبی خود دارد، در این زمان انتقال الکترون در فتوسیستم II مختل شده و الکترون اضافی ناشی از فتولیز آب، باعث تولید اکسیژن فعال و خسارت به غشای سلولی از طریق پراکسیداسیون چربی‌ها، پروتئین‌ها و کاهش محتوای کلروفیل گیاه می‌گردد. یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش کلروفیل‌ها تخریب آن‌ها به‌وسیله گونه‌های اکسیژن فعال (از جمله پراکسیدهیدروژن) می‌باشد، بنابراین بیوسنتز کلروفیل با محدودیت مواجه می‌شود (Navari-Izzo *et al.,* 1990؛ Bybordi *et al.,* 2010). کاهش قرائت شاخص سبزینگی (SPAD) و کاهش سبز بودن گیاه می‌تواند در نتیجه تخریب کلروفیل به‌واسطه محدودیت شدید آبی باشد. نتایج نشان داد، شاخص سبزینگی بیش‌ترین سهم را در میزان کلروفیل a داشت، بنابراین می‌توان گفت در تنش‌های شدید افزایش تخریب کلروفیل به‌ویژه کلروفیل a منجر به کاهش شاخص کلروفیل شد. محتوای کلروفیل برگ‌ها نیز یکی از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک می‌باشد، به‌طوری‌که از غلظت کلروفیل برگ به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی قدرت منبع یاد می‌شود و بنابراین کاهش مقدار آن در شرایط تنش کم‌آبی می‌تواند به‌عنوان یک عامل

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

محدودکننده غیرروزنه‌ای در کاهش کارایی سطح برگ به حساب آید (Ghosh *et al.*, 2004). طبق نظر Lindquist و همکاران (۲۰۰۵)، گیاهانی که شاخص کلروفیل بالاتری دارند پایداری بیش‌تری داشته و مدت زمان استفاده از تشعشع و فتوسنتز در آن‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به بالا بودن میزان کلروفیل‌ها و شاخص سبزینگی در ژنوتیپ KFS6، در مقایسه با دو ژنوتیپ دیگر این ژنوتیپ از منبع قوی برخورد می‌باشد و عامل دیگری در کاهش عملکرد آن نقش دارد.



شکل ۱: مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی میزان رنگریزه‌های فتوسنتزی در طی شاخص سبزینگی

نتایج جدول ۲ نشان داد اثر اصلی تنش کم‌آبی و ژنوتیپ بر روی فلورسانس اولیه (F_O) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین فعالیت F_O در تنش شدید و کم‌ترین میزان آن در سطح شاهد مشاهده شد. بالاترین فلورسانس اولیه از ژنوتیپ KFS2 و KFS6 مشاهده شد که هر دو در یک گروه مشترک قرار گرفتند. تنش کم‌آبی و ژنوتیپ بر فلورسانس حداکثر (F_m) نیز در سطح احتمال یک درصد اثر گذاشت (جدول ۲). با افزایش شدت تنش، از مقدار فلورسانس بیشینه کاسته شد، به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان F_m (۵۹۶/۸۹) در سطح شاهد و کم‌ترین آن (۳۰۶/۴۲) در تنش شدید (۲۵ درصد ظرفیت زراعی) مشاهده شد. هم‌چنین بیش‌ترین میزان F_m در ژنوتیپ‌های KFS6 و KFS17 به‌دست آمد (جدول ۳). اثر اصلی کم‌آبی و ژنوتیپ در سطح احتمال یک درصد بر ظرفیت

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20084403.1394.7.25.5.0]

فتوشیمیایی فتوسیستم II (عملکرد کوانتومی یا F_V/F_m) اثر معنی‌داری داشت (جدول ۲). عملکرد کوانتومی با افزایش شدت تنش خشکی روند کاهشی نشان داد، به‌طوری‌که مقدار Fv/F_m در تیمار ۲۵ درصد ظرفیت زراعی کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص داد و نسبت به شاهد به میزان ۲۵ درصد کاهش یافت. بیش‌ترین میزان این شاخص (۰/۸۶) از ۸۵ درصد ظرفیت زراعی و کم‌ترین میزان آن (۰/۶۴) از تنش شدید کم‌آبی حاصل شد (جدول ۳). عملکرد کوانتومی در سطح ژنوتیپ‌ها، نیز معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیش‌ترین عملکرد کوانتومی در ژنوتیپ‌های KFS6 و KFS17 مشاهده شد (جدول ۳).

مقدار F_V/F_m نشان‌دهنده ظرفیت انتقال الکترون PSII است، بنابراین کاهش ۲۵ درصدی نسبت F_V/F_m نشانه کاهش میزان حفاظت نوری بوده و هم‌چنین دلیلی است بر این‌که تنش خشکی بر کارایی فتوسنتزی اثر معنی‌داری داشته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان چنین استنباط نمود که کاهش F_V/F_m عمدتاً به خاطر وقوع آشفتگی در کلروپلاست بوده و کاهش عدد کلروفیل‌متر نیز این موضوع را تأیید می‌کند، زیرا فلورسانس کلروفیل به‌طور مستقیم به فعالیت کلروفیل در واکنش فتوسیستم‌ها ارتباط داشته و می‌توان از آن به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری کارایی فتوسیستم نام برد. استفاده از فلورسانس کلروفیل می‌تواند به‌عنوان یک روش کاربردی مؤثر برای ارزیابی سرعت فتوسنتز برگ باشد (Earl and Davis., 2003; Garty *et al.*, 2001). افزایش فلورسانس اولیه می‌تواند نشان‌دهنده تخریب مرکز واکنش PS_{II}، دگرگونی ساختار و تغییر در رنگدانه‌های فتوسیستم II، در شرایط تنش خشکی باشد. فلورسانس اولیه (F_O) توسط تنش‌های محیطی دچار تغییر می‌شود و تنش خشکی به تنهایی نمی‌تواند تغییرات معنی‌داری در F_O ایجاد کند، معمولاً تنش گرمایی به تنهایی و یا در ترکیب با تنش خشکی است که موجب انهدام و یا تخریب مرکز واکنشی فتوسیستم II می‌شود (Havaux and Niyogi, 1999). فتوسیستم II بسیار حساس به عوامل بازدارنده محیطی بوده و تنش کم‌آبی باعث خسارت به این مرکز می‌شود (Makhdum *et al.*, 2002). در حقیقت میزان فلورسانس کلروفیل، سالم بودن غشای تیلاکوئید و کارایی نسبی انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I را نشان می‌دهد. هنگامی که مولکول‌های کوئینون (اولین کوئینون گیرنده الکترون فتوسیستم II) در وضعیت کاملاً اکسید شده هستند، سیستم دارای کم‌ترین فلورسانس (F_O) است که به‌تدریج با افزایش وضعیت احیایی این مولکول‌ها، فلورسانس افزایش می‌یابد. این روند تا احیای کامل مولکول‌های آن ادامه پیدا می‌کند. در چنین حالتی مرکز فتوسیستم در حالت احیای کامل بوده و دارای بیش‌ترین فلورسانس (F_m) است. به نظر می‌رسد کاهش در فلورسانس حداکثر (F_m) در شرایط تنش خشکی، نشان‌دهنده اکسیداسیون کم‌تر Q_a تحت شرایط تنش خشکی است که موجب کاهش واکنش‌های فتوشیمیایی در سطوح تنش خشکی شده است. نتایج آزمایش‌های Mohammadian و همکاران (۲۰۰۳) نیز نشان داد که فلورسانس حداکثر (F_m) تحت شرایط تنش

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

کم‌آبی در چغندر قند کاهش یافت. اصولاً مقدار فلورسانس کلروفیل در زمانی که Q_a در حالت احیاء باشد، زیاد است و به این دلیل مقدار فلورسانس متغیر (F_v)، نیز در این حالت زیاد می‌شود؛ اما هنگامی که Q_a در حالت اکسید باشد مقدار فلورسانس کلروفیل کم خواهد بود. در واقع، تنش خشکی با اثر منفی که بر تثبیت کربن می‌گذارد، ظرفیت پذیرش و انتقال الکترون را کاهش داده، در نتیجه سیستم به‌سرعت به F_m می‌رسد که نتیجه آن کاهش فلورسانس متغیر (F_V) خواهد بود. از طرفی، با افزایش شدت نور، سیستم فتوسنتزی با یک روش تنظیمی، برای کاهش انرژی القاء شده تحریکی، انرژی مازاد را به طریق افزایش خاموشی غیرفتوشیمیایی، به‌صورت فرآیند غیرتشعشعی از دست می‌دهد. با این سازوکار تنظیمی، ضمن حفاظت از مرکز واکنش، موجب می‌گردد که حداقل صدمه به این مرکز وارد شود (Bhardway and Signal, 1981).

نتایج معادلات رگرسیونی نیز نشان داد در بین شاخص‌های فلورسانس، فلورسانس حداکثر (F_m) بیش‌ترین سهم را در پیش‌بینی میزان کلروفیل a (R^2=۰/۵۸۳)، نسبت کلروفیل‌ها (R^2=۰/۶۷۴) و پایداری کلروفیل (R^2=۰/۴۲۱) را به خود اختصاص داد و تغییرات آن با میزان کلروفیل a، نسبت کلروفیل‌ها از نوع در جه دوم و با پایداری کلروفیل‌ها از نوع خطی است. این در حالی است که اختلاف بین فلورسانس‌ها (F_V) بیش‌ترین سهم را در پیش‌بینی میزان کلروفیل b (R^2=/۳۳۷) و کلروفیل کل (R^2=۰/۴۳۸) نشان داد و تغییرات آن‌ها با یک دیگر به‌صورت خطی بود (جدول ۵). افزایش تنش موجب کاهش یافتن مقدار Fv/F_m شده که نشانه کاهش میزان حفاظت نوری و تقلیل کارایی فتوسنتزی است؛ بنابراین گیاه با افزایش میزان کارتنوئیدها برای افزایش محافظت نوری استفاده می‌کنند. نتایج نشان داد مقدار F_V/F_m بیش‌ترین سهم را در پیش‌بینی میزان کارتنوئیدها (R^2=۰/۵۷۵) دارد به‌طوری‌که تغییرات آن با میزان کارتنوئیدها به‌صورت خطی بود (جدول ۴). مقدار F_V/F_m نشان‌دهنده ظرفیت انتقال الکترون از فتوسیستم II است؛ کاهش کارایی فتوسیستم II در زمانی که برگ‌ها به‌طور ناگهانی در معرض نور شدید قرار گیرند و به مرکز فتوسیستم II صدمه می‌زند و یا وقتی که در معرض محدودیت آبی قرار گیرد اتفاق می‌افتد. در این حالت این کاهش مربوط به افزایش شدید انرژی برانگیختگی غیرتشعشعی است که منجر به آزادسازی انرژی به‌صورت حرارتی می‌شود. (Paknejad *et al.*, 2007).

عملکرد علوفه در طی اثر اصلی کم‌آبی و ژنوتیپ در سطح احتمال یک درصد تغییر معنی‌دار پیدا کرد. هم‌چنین برهمکنش کم‌آبی در ژنوتیپ در سطح احتمال پنج درصد بر میزان علوفه سورگوم معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها برهمکنش نشان داد که تنش کم‌آبی موجب کاهش عملکرد علوفه‌ای سورگوم شد. به‌طوری‌که تنش ۴۵ درصد ظرفیت زراعی موجب کاهش ۶۵، ۴۵ و ۵۳ درصد عملکرد به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های KFS2، KFS6 و KFS17 شد و با تشدید تنش به ۲۵ درصد ظرفیت زراعی تغییرات به ۷۷، ۶۸ و ۷۸ درصد افزایش یافت؛ بنابراین مشاهده می‌شود که تنش

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

بر میزان عملکرد ژنوتیپ‌های KFS2 و KFS17 بیش‌تر از KFS6 اثر گذاشته است ولی با این وجود این ژنوتیپ‌ها عملکرد بالاتری نشان دادند به‌طوری‌که در تنش ۲۵ درصد ظرفیت زراعی بیش‌ترین عملکرد از ژنوتیپ KFS2 با عملکرد ۰/۳۲ گرم در بوته به‌دست آمد (جدول ۵). این نتایج با یافته‌های کهن‌مو و مظاهری (۱۳۸۲) مطابقت دارد. تقلیل عملکرد را می‌توان به علت کاهش سطح برگ، ریزش برگ‌ها، کاهش وزن و ارتفاع ساقه در بوته و کاهش تعداد پنجه در اثر تنش دانست. اعمال هرگونه تنش در تولید علوفه سبب کاهش کیفیت برخی از صفات زراعی علوفه می‌شود. Martens (۲۰۰۷) علت کاهش علوفه یونجه را در تنش‌های کم‌آبی، مربوط به کاهش تعداد و ارتفاع ساقه و هم‌چنین کاهش میزان فتوسنتز در اثر بسته شدن روزنه‌ها می‌داند.

جدول ۵: مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی شاخص‌های فتوسنتزی در طی عوامل فلورسانس آن‌ها

صفات وابسته X	ژنوتیپ	همبستگی	ضرایب رگرسیونی معادله				مدل
			b_0	b_1	b_2	b_3	
کلروفیل a	F_0	۰/۲۰۷	۱/۱۹۶	-۰/۰۰۲۲۹	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_t	۰/۴۹۷	۱/۳۰۲	-۰/۰۰۰۹۴	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_m	۰/۵۸۳	۰/۲۶۱	۰/۰۰۲۲۶	-۲×۱۰^{-۵}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X+b_2X^2$
	F_V/F_m	۰/۵۰۰	۰/۴۳۷	۰/۶۹۳	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
کلروفیل b	F_0	۰/۰۴۱	۰/۵۷۹	-۰/۰۰۰۷۲	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_t	۰/۳۳۷	۰/۷۱۲	-۰/۰۰۰۵۴	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_m	۰/۳۰۱	۰/۳۲۰	۰/۰۰۰۳۸	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_V/F_m	۰/۲۱۹	۰/۲۶۴	۰/۳۲۵	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
کلروفیل کل	F_0	۰/۱۳۹	۱/۷۶۷	۰/۰۰۲۹۷	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_t	۰/۴۹۸	۲/۰۱۳	-۰/۰۰۱۴۹	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_m	۰/۴۸۹	۰/۹۱۹	۰/۰۰۱۱۱	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_V/F_m	۰/۴۲۴	۰/۷۰۲	۱/۰۱۲	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
نسبت a به b	F_0	۰/۲۱۹	۰/۸۴۸	۰/۰۰۰۹۴	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_t	۰/۵۶۹	۲/۴۱۵	-۰/۰۰۶۷۶	۱۳×۱۰^{-۶}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X+b_2X^2$
	F_m	۰/۶۷۴	۵/۴۳۵	-۰/۰۱۲۷۲	۱۰×۱۰^{-۶}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X+b_2X^2$
	F_V/F_m	۰/۶۰۵	۴/۱۲۳	-۳/۰۶۳	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
کارتنوئیدها	F_0	۰/۳۲۵	۱۰/۷۱	۰/۰۴۵۷	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_t	۰/۳۳۲	۱۱/۱۹	۰/۰۱۲۲۳	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_m	۰/۵۷۳	۲۹/۳۶	-۰/۰۴۹۵۴	۴۱×۱۰^{-۶}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X+b_2X^2$
	F_V/F_m	۰/۵۷۵	۲۴/۳۶	-۱۱/۷۳	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
پایداری کلروفیل	F_0	۰/۰۸۵	۱۱۲/۱	-۰/۲۱۳۹	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_t	۰/۳۶۹	۱۳۱/۰	-۰/۱۰۶۰	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_m	۰/۴۲۱	۴۷/۰۶	۰/۰۹۵۱۳	….^{ns}	….^{ns}	$Y=b_0+b_1X$
	F_V/F_m	۰/۳۵۶	۶۲۰/۴	-۲۸۵۳	۴۷۳۷	-۲۴۹۰	$Y=b_0+b_1X+b_2X^2+b_3X^3$

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که نسبت کلروفیل a به b و پایداری کلروفیل‌ها، بالاترین سهم در پیش‌بینی میزان عملکرد را دارند، به‌طوری‌که ژنوتیپ KFS2 به‌عنوان ژنوتیپ متحمل و داشتن بالاترین عملکرد علوفه‌ای بالاترین سهم در پیش‌بینی عملکرد علوفه‌ای از نسبت کلروفیل a به b (R^2=۰/۹۵۴) و پایداری کلروفیل‌ها (R^2=۰/۶۷۵) نشان داد. تغییرات نسبت کلروفیل a به b با عملکرد علوفه‌ای به‌صورت معادله درجه سوم و تغییرات عملکرد علوفه‌ای و پایداری کلروفیل‌ها به‌صورت خطی بود؛ بنابراین افزایش پایداری کلروفیل‌ها سبب افزایش عملکرد به‌صورت خطی می‌شود این در حالی است

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

که افزایش نسبت کلروفیل a به b ابتدا موجب افزایش عملکرد می‌شود بعد از رسیدن به یک محدوده‌ای سبب کاهش عملکرد می‌شود ولی با رسیدن نسبت کلروفیل a به b به بیش‌ترین مقدار خود عملکرد علوفه‌ای مجدداً افزایش پیدا کرد (جدول ۶). ریزش برگ‌ها از جمله عوامل کاهش‌دهنده وزن خشک محسوب می‌شود که این امر می‌تواند به علت تحریک فعالیت آنزیم‌های دیواره‌ای از قبیل سلولاز و پلی‌گالاکتوروناز به هنگام کاهش محتوای آب نسبی بافت باشد (Karamanos, 1978).

جدول ۶: مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی عملکرد علوفه‌ای در طی شاخص‌های فتوسنتزی

صفات وابسته X	ژنوتیپ	همبستگی	ضرایب رگرسیونی معادله				مدل
			b_0	b_1	b_2	b_3	
کلروفیل a	KFS2	۰/۴۴۵	-۱/۵۹۴	۲/۵۱۵	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS6	۰/۴۱۲	-۱/۳۱۴	۱/۸۱۹	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS17	۰/۵۸۶	-۰/۷۰۰	۱/۳۹۷	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
کلروفیل b	KFS2	۰/۱۸۹	-۰/۷۶۴	۳/۲۷۱	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS6	۰/۳۷۵	-۰/۵۵۵۹	۱/۷۹۱	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS17	۰/۳۲۹	-۰/۳۹۷	۲/۰۱۳	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
کلروفیل کل	KFS2	۰/۴۱۶	-۱/۶۵۰	۱/۷۳۲	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS6	۰/۴۴۳	-۱/۱۰۹	۱/۰۱۸	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS17	۰/۵۴۳	-۰/۷۳۴	۰/۹۴۴	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
نسبت a به b	KFS2	۰/۹۵۴	-۶/۸۱۹	۱۷/۷۴	-۱۱/۰۴	۱/۹۷۸	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^2$
	KFS6	۰/۲۷۴	۰/۹۲۹	-۰/۲۶۱	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS17	۰/۷۶۳	-۵/۳۲۸	-۴/۱۶۸	۰/۸۳۱	....ns	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$
کارتنوئیدها	KFS2	۰/۳۶۱	۲/۷۲۱	-۰/۱۲۵	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS6	۰/۳۲۸	۱/۶۹۳	-۰/۰۷۴۵	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS17	۰/۵۶۹	۲/۳۵۲	-۰/۱۱۵	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
پایداری کلروفیل	KFS2	۰/۶۷۵	-۰/۵۷۲	۰/۰۱۲۲	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS6	۰/۳۰۳	-۰/۳۵۹	۰/۰۰۷۹	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$
	KFS17	۰/۴۵۶	-۰/۳۶۴	۰/۰۰۹۸	....ns	....ns	$Y = b_0 + b_1X$

کاهش برگ‌ها در طی تنش می‌تواند موجب کاهش سایه‌اندازه‌ی برگ‌ها بر یکدیگر و افزایش تابش رسیده به برگ‌ها و افزایش میزان فلورسانس کلروفیل‌ها و کاهش میزان کلروفیل‌ها به‌ویژه کلروفیل a شده و بر نسبت و پایداری کلروفیل‌ها اثر معنی‌دار می‌گذارد. هم‌چنین تنش از طریق افزایش رادیکال‌های آزاد می‌تواند بر میزان فلورسانس و عملکرد کلروفیل‌ها اثر گذاشته و موجب کاهش فعالیت‌های فتوسنتزی و کاهش عملکرد می‌شود. با توجه به نتایج مشاهده شد که ژنوتیپ KFS6 از نظر شاخص‌های فتوسنتزی و قدرت منبع دارای ضعف نمی‌باشد و عملکرد پایین آن می‌تواند به علت پایین بودن مخزن و یا راندمان پایین انتقال مواد فتوسنتزی باشد که موجب شده است این ژنوتیپ به‌عنوان ژنوتیپ حساس به تنش شناخته شود. در واقع می‌توان گفت ژنوتیپ KFS2 با انتقال بهتر مواد فتوسنتزی به اندام‌های ذخیره‌ای و تولید شاخ و برگ‌های بیش‌تر و هم‌چنین حفظ و نگهداری از شاخ و برگ‌های تولیدی در طی تنش از طریق میزان بالای کارتنوئیدها و هم‌چنین فعالیت بالای متابولیت‌های سازگاری توانسته عملکرد بالایی تولید کند. این در حالی است که ژنوتیپ KFS6 اگرچه میزان

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20084403.1394.7.25.5.0]

فتوسنتز خوبی داشته است ولی قادر به تولید عملکرد بالا نشده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج مشاهده شد که تنش کم‌آبی موجب کاهش میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، پایداری کلروفیل و F_m ، F_V/F_m و عملکرد علوفه‌ای و سبب افزایش میزان کارتنوئیدها، نسبت کلروفیل a به b، پایداری کلروفیل و F_O و F_t شد. هم‌چنین در بین ژنوتیپ‌ها KFS6 بالاترین میزان کلروفیل‌ها و F_O، F_t، F_m و F_V/F_m را به خود اختصاص داد. ولی با این وجود کم‌ترین عملکرد را در بین ژنوتیپ‌ها نشان داد؛ بنابراین می‌توان استنباط نمود که عوامل دیگری نیز بر میزان عملکرد در شرایط تنش نقش دارند. در بین شاخص‌های فتوسنتزی نسبت کلروفیل و پایداری کلروفیل‌ها بالاترین سهم را در پیش‌بینی عملکرد علوفه‌ای سورگوم نشان داد.

منابع

درویشی‌بلوچی، م.، پاک‌نژاد، ف.، کاشانی، ع. و اردکانی، م.ر. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر تنش خشکی و تغذیه برگی برخی از عناصر کم‌مصرف بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل، محتوای کلروفیل، محتوای آب نسبی، پایداری غشاء و عملکرد دانه ذرت (SC ۷۰۴). مجله علوم گیاهان زراعی ایران. ۳: ۵۴۳-۵۳۱.

عشقی‌زاده ، ح.ر. و احسان‌زاده، پ. ۱۳۸۸. عملکرد هیبریدهای ذرت تحت متفاوت رژیم آبیاری: فلورسانس کلروفیل، رشد و عملکرد دانه. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳۲: ۸۷-۶۰.

کهن‌مو، م. ا. و مظاهری، د. ۱۳۸۲. اثر فواصل آبیاری و نحوه تقسیط کود ازت بر برخی صفات کمی و کیفی سورگوم علوفه‌ای. مجله علوم زراعی ایران. ۵: ۸۴- ۷۵.

موسوی، س.غ.ر.، میرهادی، م.ج.، سیادت، س.ع.، نورمحمدی، ق. و درویش، ف. ۱۳۸۸. تأثیر تنش کم‌آبی و کود نیتروژن بر عملکرد و راندمان مصرف آب سورگوم و ارزن علوفه‌ای. مجله دانش نوین کشاورزی دانشگاه آزاد میانه. ۱۵: ۱۱۴-۱۰۱.

Anon, A.N. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. Agronomy Journal 23: 112- 121.

Arnon, D.I 1949. Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta Vulgaris*. Plant Physiology 24:1-15.

Bhardway, R. and Signal, G. 1981. Effect of water stress on photochemical activity of chloroplasts during greening etiolated barley seedlings. Plant Cell Physiology 22: 155-162.

Bybordi, A., Tabatabaei, S.J. and Ahmadev, A. 2010. Effect of salinity on fatty acid composition of Canola (*Brassica napus* L). Journal Food. Agriculture .Environment 8: 113-115.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

Earl, H.J. and Davis, R.F. 2003. Effect of drought stress on leaf canopy radiation use efficiency and yield of maize. Agronomy Journal 95: 688- 696.

Fracheboud, Y. 2006. Using chlorophyll fluorescence to study photosynthesis. Institute of Plant Science ETH, Universitatstrass, CH- 8092 Zurich.

Fukai, S. and Cooper, M. 1995. Development of drought resistance cultivar using, Physiomorphological traits in rice. Field Crop Research 40: 67-84.

Garty, J., Tamir, O., Hasid, I., Eschel, A., Cohen, Y., Kamieli, A. and Orlovsky, L. 2001. Photosynthesis, chlorophyll integrity, and spectral reflectance in lichens exposed to air pollution. Journal Environment Quality 30: 884-893.

Ghosh, P.K., Ajay, K.K., Bandyopadhyay, M.C. Manna, K.G., Mandal, A.K. and Hati, K.M., 2004. Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer-NPK on three cropping system in vertisols of semi-arid tropics. Dry matter yield, nodulation, chlorophyll content and enzyme activity. Bioresour Technology. 95: 85- 93.

Gusegnova, I.M., Suleymanov, S.Y. and Aliyev, J.A. 2006. Protein composition and native state of pigments of thylakoid membrane of Wheat genotypes differently tolerant to water stress. Biochemistry 71: 223- 228.

Havaux, M. and Niyogi, K.K. 1999. The violoxanthin cycle protects plants from photo oxidative damage by more than one mechanism. Proceedings of the National Academy of Sciences 96: 8762- 8767.

Karamanos, A.J. 1978. Water stress and leaf growth of field beans (*Vicia faba* L.) in the field: leaf number and total leaf area. Annals of Botany 42: 1393- 1402.

Koyro, H.W. 2006. Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). Environmental and Experimental Botany 56: 136-149.

Lindquist, J.L., Arkebauer, J.T., Walters, T.D., Cassman, G.K., and Dobermann, A. 2005. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. Agronomy Journal 97: 72-78

Majumdar, S., Ghosh, S., Glick, B.R. and Dumb, E.B., 1991. Activities of chlorophyllase, phosphoenolpyruvate carboxylase and ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase in the primary leaves of soybean drying denescence and drought. Physiology Planetarium 81: 473- 480.

Makhdum, M.I., Malik, M.N.A., Din, S.U., Ahmad, F. and Chaudhry, F.I. 2002. Physiological response of cotton to methanol foliar application. Journal Research Science. 13: 37-43.

Martens, D. 2007. Management of drought stressed alfalfa, available at http:/www.Co.

Mohammadian, R., Rahimian, H., Moghaddam, M. and Sadeghian, S.Y. 2003. Effect of

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]

early drought stress on sugar beets chlorophyll fluorescence. Pakistan Journal Biology Science 6: 1763-1769.

Mohsenzade, S., Malboobi, M.A., Razavi, K. and Farrahi Aschtiani, S. 2006. Physiological and molecular responses of Aeluropus lagopoides (*poaceas*) to water deficit. Environmental and Experimental Botany 56:374-322.

Navari-Izzo, F., Quartacci, M.F. and Izzo, R. 1990. Water –stress induced changes in protein and frees amino acids in field grown maize and sun flower. Plant Physiology and Biochemistry 28:531-537.

Oncel, I., Keles, Y. and Ustun, A.S. 2000. Interactive of temperature and heavy metal stress on the growth and some biological compounds in wheat seedling. Environmental Pollution 107: 15-320.

Paknejad, F., Nasri, M., Tohidi Moghadam, H.R., Zahedi, H. and Jami Alahmad, M. 2007. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters chlorophyll content and grain yield of wheat cultivars. Journal Biological Sciences 7: 841- 847.

Premachandra, G.S., Saneoka, H., Fujita, K. and Ogata, S. 1992. Seasonal changes in leaf water relations and cell membrane stability in Orchard grass. Journal Agriculture Science 121: 169-175.

Ranjan, R., Bohra, S.P. and Jeel, A.M. 2001. Book of plant senescence. Jodhpur, Agro bios New York. PP. 18- 42.

Sairam, R.K., Deshmukh, P.S. and Saxna, D.C. 1998. Role of antioxidant systems' in Wheat genotype tolerance to water stress. Plant Biology 41: 387- 394.

Sairam, R.K., Desmuk, P.S. and Shukla, DS. 1997. Tolerance of drought and temperature stress in relation to increase antioxidant enzyme activity in wheat. Journal Agronomy Crop Science 178:171-178.

Sajjadinia, A., Ershadi, A., Hokmabadi, H., Khayyat, M. and Gholami, M. 2010. Gas exchange activities and relative water content at different fruit growth and developmental stages of on and off cultivated pistachio trees. American Journal Agriculture Economy 1:1- 6.

Singh, B.R. and Singh, D.P. 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. Field Crops Research 42: 57- 67.

Smith, C.W. and Fredriksen, RA. 2000. Sorghum: Origin, History, Technology and Production. John Wiley & sons, Inc.

Terzi, R. and Kadioglu, A. 2006. Drought stress tolerance and the antioxidant enzyme system in Ctenanthe. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica 48: 89- 96.

Thakur, M., Sharma, A.D. 2005. Salt Stress and Phytohormone (ABA) Induced changes in germination, sugars and enzymes of carbohydrate metabolism in *Sorghum bicolor* (L.) Moench seeds. Journal Agriculture Social Science 1: 89- 93.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.2008403.1394.7.25.5.0]