نشریه علمی پژوهشی دانش کشاورزی و تولید پایدار
جلد ۳۲ شماره ۴ / زمستان / ۱۴۰۱/ صفحات ۲۱۵-۲۰۱

Investigation of Morphophysiological Characteristics of Cultivars and Promising Lines of Grain Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under Late Season Drought Stress

Azim Khazaei[1*], Maryam Shahbazi[2], Atefeh Sabouri[3], Zahra Sadat Shobbar[4], Farid Golzardi[1]

Received: 26 December 2021 Accepted: 19 March 2022
1-Assist.Prof., Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
2-Assoc.Prof., Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
3-Assoc.Prof., Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
4-Assoc.Prof., Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
*Corresponding Author Email: a.khazaei@areeo.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Due to the spread of droughts in recent years, the need to pay attention to drought-tolerant crops such as sorghum has increased. This study aimed to investigate some physiological mechanisms of drought tolerance in grain sorghum genotypes.

Materials and Methods: The experiment was conducted as a split plots design based on randomized complete block design with three replications at Karaj. Irrigation regime during the reproductive period was the main factor at three levels (irrigation after 60 and 120 mm evaporation, and irrigation cut-off), and genotype was the sub-factor at five levels (cultivars Kimiya, Sepideh, and Fouman and promising lines KGS15 and KGS32).

Results: Under normal irrigation, the highest grain yield (8994 $kg.ha^{-1}$) was obtained by cultivar Kimia. In contrast, the maximum grain yield under deficit irrigation and irrigation cut-off conditions (7633 and 6275 $kg.ha^{-1}$) was recorded in cultivar Fouman. Also, under stress conditions, cultivar Fouman showed the highest stomatal conductivity and the lowest percentage of yield reduction compared to normal irrigation. In addition, the lowest canopy temperature was recorded in Fouman cultivar under deficit irrigation and irrigation cut-off conditions (32.40 and 32.63 °C, respectively).

Conclusion: Overall, cultivar Fouman with higher water uptake efficiency than other genotypes, which showed more stomatal conductivity and lower canopy temperature, was able to reduce the severity of water deficit stress in the plant and to produce maximum grain yield under drought conditions. Cultivar Kimia was able to increase its water absorption capacity and produce a relatively good yield under stress conditions by reducing the osmotic potential and increasing the accumulation of osmolytes such as soluble sugars and proline.

Keywords: Canopy Temperature, Genotype, Grain Yield, Osmotic Potential, Proline

بررسی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی ارقام و لاین‌های امیدبخش سورگوم دانه‌ای [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] تحت تنش خشکی آخر فصل

عظیم خزائی[1*]، مریم شهبازی[2]، عاطفه صبوری[3]، زهراسادات شبر[4]، فرید گل‌زردی[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸

۱- استادیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۳- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۴- دانشیار، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
* مسئول مکاتبه: Email: a.khazaei@areeo.ac.ir

چکیده

مقدمه و اهداف: با توجه به گسترش خشکسالی‌ها در سال‌های اخیر، ضرورت توجه به گیاهان زراعی متحمل به خشکی همچون سورگوم افزایش یافته است. این مطالعه به‌منظور بررسی برخی از مکانیسم‌های فیزیولوژیکی تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در کرج اجرا شد. رژیم آبیاری طی دوره زایشی به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح (آبیاری بعد از ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر و قطع آبیاری) و ژنوتیپ به‌عنوان عامل فرعی در پنج سطح (ارقام کیمیا، سپیده و فومن و لاین‌های امیدبخش KGS15 و KGS32) بودند.

یافته‌ها: تحت آبیاری معمول بیشترین عملکرد دانه (۸۹۹۴ کیلوگرم در هکتار) توسط رقم کیمیا به دست آمد درحالیکه حداکثر عملکرد دانه در شرایط کم‌آبیاری و قطع آبیاری (۷۶۳۳ و ۶۲۷۵ کیلوگرم در هکتار) در رقم فومن ثبت گردید. همچنین در شرایط تنش، رقم فومن بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای و کمترین درصد کاهش عملکرد در مقایسه با آبیاری نرمال را نشان داد. علاوه بر این کمترین دمای کانوپی در شرایط کم‌آبیاری و قطع آبیاری (به‌ترتیب ۳۲/۴۰ و ۳۲/۶۳ درجه سانتی‌گراد) در رقم فومن ثبت گردید.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی رقم فومن با کارآیی جذب آب بالاتر نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها که به صورت هدایت روزنه‌ای بیشتر و دمای کانوپی پائین‌تر نمود پیدا کرد، توانست با سازوکار اجتناب، از شدت تنش کم‌آبی در گیاه بکاهد و حداکثر عملکرد دانه در شرایط خشکی را تولید نماید. رقم کیمیا نیز از طریق کاهش پتانسیل اسمزی و افزایش تجمع اسمولیت‌هایی مانند قندهای محلول و پرولین، توانست قدرت جذب آب خود را افزایش دهد و عملکرد نسبتاً مطلوبی در شرایط تنش تولید نماید.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل اسمزی، پرولین، ژنوتیپ، دمای کانوپی، عملکرد دانه

مقدمه

گسترش خشکسالی‌ها و کمبود منابع آب آبیاری، به‌خصوص در نظام‌های زراعی وابسته به آبیاری تکمیلی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات در راه تولید غذا شناخته شده و امنیت غذایی را به خطر انداخته است (بغدادی و همکاران ۲۰۲۱)؛ بنابراین اهمیت توجه به کشت گیاهان زراعی مقاوم به خشکی و روش‌های صرفه‌جویی در مصرف آب روز به روز افزایش می‌یابد (بالازاده و همکاران ۲۰۲۱). یکی از راه‌کارهای مؤثر برای ارتقای امنیت غذایی و کاهش ریسک تولید در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاشت گیاهان زراعی سازگار و پرمحصولی همچون سورگوم می‌باشد (عاشوری و همکاران ۲۰۲۱). سورگوم از نظر اهمیت در بین غلات در دنیا بعد از گندم، برنج، ذرت و جو در مقام پنجم قرار دارد و در بعضی از کشورها از جمله سودان در مقام اول و در ایالات متحده آمریکا بعد از گندم و ذرت در مقام سوم قرار گرفته است (خزائی و همکاران ۲۰۲۱). طی سال ۲۰۲۰ میلادی سطح زیرکشت سورگوم در جهان بیش از ۴۰ میلیون هکتار بود که ۹۰ درصد آن به کشت ارقام دانه‌ای اختصاص داشت (بی‌نام ۲۰۱۹)؛ بنابراین سورگوم در دنیا در درجه اول به‌عنوان یک غله مطرح است. سطح زیر کشت سورگوم در ایران بیش از ۴۰ هزار هکتار می‌باشد (خزائی و همکاران ۲۰۱۹).

سورگوم در برابر تنش‌های محیطی (به جز سرما) مقاومت بالایی دارد و به راحتی می‌تواند در محیط‌های کم‌برخوردار سازگار شود (خزائی و همکاران ۲۰۲۰، کاپلان و همکاران ۲۰۱۹). سورگوم به‌دلیل ساختار مناسب سیستم ریشه‌ای، از آب و مواد مغذی به‌طور کارآمدی استفاده می‌کند و از عملکرد ماده خشک بالاتری نسبت به سایر غلات تابستانه برخوردار است (خزائی و همکاران ۲۰۱۷، خزائی و همکاران ۲۰۱۹). سورگوم می‌تواند در خاک‌های فقیر و تحت شرایط آب و هوائی گرم و خشک، عملکرد دانه و علوفه قابل‌قبولی تولید نماید درحالی‌که ذرت در این شرایط قادر به رشد و تولید نیست (دباغ محمدی نسب و همکاران ۲۰۱۷). چنین ویژگی‌هایی باعث شده است که گیاه سورگوم در مناطق خشک و خاک‌های دارای آب و مواد غذایی محدود، به یک محصول برتر تبدیل شود (خزائی و همکاران ۲۰۲۱، خزائی ۲۰۲۰). علاوه بر این زمان کاشت تطبیق‌پذیر، فصل رشد نسبتاً کوتاه و امکان قرارگیری در تناوب‌های زراعی گوناگون (میرکی و همکاران ۲۰۲۱) و همچنین کاربردهای متعدد دانه، ساقه و برگ آن در صنایع غذایی و سلولزی، سوخت‌های زیستی و خوراک دام و طیور باعث شده است توجه به کشت سورگوم به عنوان یک محصول زراعی مهم افزایش یابد (حسن و همکاران ۲۰۱۹).

پاسخ گیاهان زراعی در واکنش به تنش خشکی از طریق تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و فرایندهای متابولیکی ظاهر می‌شود (برخوری مهنی و همکاران ۲۰۲۱). بررسی‌ها نشان داده که تنش خشکی باعث کاهش نرخ فتوسنتز، تخریب غشای سلولی، تجمع اسیدهای آمینه، آسیب به رنگیزه‌ها و پلاستیدها، کاهش محتوی کلروفیل، کاهش رشد ریشه‌ها و برگ‌ها و در نهایت اُفت عملکرد گیاه می‌شود (گل‌زردی و همکاران ۲۰۱۲، بغدادی و همکاران ۲۰۲۱، فتحی رضائی و همکاران ۲۰۲۱). به‌طور کلی کاهش محتوای آب بافت‌های گیاهی تحت شرایط کم‌آبی باعث محدود شدن رشد گیاه و برخی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی می‌گردد (بهتری و همکاران ۲۰۰۹، بالازاده و همکاران ۲۰۲۱). تجمع پرولین در شرایط تنش خشکی، یکی از ویژگی‌های معمول در بسیاری از گیاهان زراعی است و مشخص شده است که یک همبستگی قوی بین افزایش سطح پرولین و درصد بقاء در شرایط کمبود آب وجود دارد (بایومی و همکاران ۲۰۰۸). مهندسی مقاومت به خشکی در گیاهان زراعی، از اهمیت زیادی برخوردار است و ضروری است تا مکانیسم‌های مولکولی و ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی مؤثر در مقاومت به خشکی محصولات زراعی، مورد شناسایی قرار گیرند (کیخا و همکاران ۲۰۱۹).

مطالعات متعددی تأثیر تنش خشکی بر سورگوم را گزارش کرده‌اند (بغدادی و همکاران ۲۰۲۱، فرهادی و همکاران ۲۰۲۲، باتیستا و همکاران ۲۰۱۹). تنش کم‌آبی بر مراحل رشد و نمو سورگوم از زمان جوانه‌زنی تا مراحل زایشی و پر شدن دانه تأثیر می گذارد، خواص

مرفوفیزیولوژیکی آن را تغییر می‌دهد و در نهایت منجر به کاهش قابل توجه عملکرد دانه می‌شود (آبرها و همکاران ۲۰۲۲). فرهادی و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی اثر آبیاری کامل، تنش خشکی متوسط و شدید (با تأمین به‌ترتیب ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد کمبود رطوبت خاک) گزارش کردند آبیاری محدود باعث کاهش عملکرد و افزایش کارایی مصرف آب سورگوم شد. خزائی و فومن (۲۰۱۲) با بررسی تأثیر آبیاری پس از ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A بر ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای گزارش کردند که در تمام رژیم‌های آبیاری موردبررسی، لاین KGS32 و پس از آن رقم کیمیا بیشترین عملکرد دانه را تولید کردند. باتیستا و همکاران (۲۰۱۹) نیز تأثیر آبیاری کامل (کل فصل رشد) و قطع آبیاری طی دوره زایشی را بر عملکرد ۳۰ ژنوتیپ سورگوم بررسی و گزارش کردند که تنش خشکی عملکرد دانه را در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ به‌ترتیب به میزان ۶۸/۹ و ۳۱/۲ درصد و به طور متوسط ۵۰/۱ درصد کاهش داد.

عملکرد دانه یکی از مهمترین صفات برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در گیاهان زراعی است. در اصلاح نباتات، ایجاد ژنوتیپ‌هایی با پتانسیل تولید بالاتر در شرایط تنش خشکی و به‌طور همزمان در شرایط آبیاری نرمال به عنوان یک هدف مهم مطرح می‌باشد (خزائی و همکاران ۲۰۱۷)؛ بنابراین گزینش برای سایر صفات تحمل به خشکی بدون در نظر گرفتن عملکرد نتیجه چندانی نخواهد داشت (خزائی و فومن ۲۰۱۲). با توجه به مطالب ذکر شده این پژوهش با هدف مطالعه عملکرد و برخی خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای تحت تنش خشکی به منظور معرفی ارقام حساس و متحمل به خشکی و همچنین شناسایی صفات مطلوب برای گزینش ارقام متحمل به خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه پژوهشی ۴۰۰ هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج واقع در طول جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۵۰ درجه و ۷۵ دقیقه شرقی انجام شد. اثر رژیم آبیاری در دوره زایشی به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح، شامل آبیاری نرمال (آبیاری بعد از ۶۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از سطح تشتک تبخیر کلاس A)، کم‌آبیاری (آبیاری بعد از ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از سطح تشتک تبخیر کلاس A) و قطع آبیاری بررسی شد. ژنوتیپ نیز به‌عنوان عامل فرعی در پنج سطح (شامل ارقام کیمیا، سپیده و فومن و لاین‌های امیدبخش KGS15 و KGS32) مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که طی دوره رویشی در تمامی تیمارها، آبیاری بعد از ۶۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از سطح تشتک تبخیر کلاس A انجام گردید و رژیم‌های مختلف آبیاری در دوره زایشی (با آغاز گلدهی) اعمال شدند. ارقام کیمیا و سپیده، ژنوتیپ‌های متوسطرس سورگوم دانه‌ای بوده که برای کشت در مناطق گرم کشور مناسب هستند، در حالی‌که فومن، رقم زودرس سورگوم دانه‌ای جهت کشت در مناطق مختلف کشور (نیمه‌سرد، معتدل و گرم) می‌باشد. لاین‌های امیدبخش KGS15 و KGS32 نیز ژنوتیپ‌های متوسطرس سورگوم دانه‌ای هستند که هنوز به عنوان رقم معرفی نشده‌اند. تمامی ارقام و لاین‌های موردبررسی در این آزمایش، توسط مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تولید شده‌اند.

هر کرت آزمایشی شامل شش خط کاشت به طول پنج متر با فاصله بین ردیف ۶۰ سانتی‌متر بود و فاصله بین بوته‌ها روی خطوط ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (تراکم ۱۶۷ هزار بوته در هکتار). بر اساس نتایج آزمون خاک (جدول ۱) و نیاز غذایی سورگوم، ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات آمونیوم و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در زمان کاشت به زمین اضافه شد. علاوه بر این ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به عنوان سرک در مرحله ۸- ۶ برگی بوته‌ها مصرف شد. لازم به ذکر است که سورگوم برای تولید یک تن دانه به ۱۶ کیلوگرم نیتروژن، ۶ کیلوگرم پتاس و ۳ کیلوگرم فسفر نیاز دارد (خزائی و همکاران ۲۰۱۹). عملیات کاشت به

صورت دستی در تاریخ ششم خرداد ماه انجام شد. به منظور کنترل علف‌های هرز، علف‌کش ارادیکان به میزان پنج لیتر در هکتار به صورت پیش‌کاشت و علف‌کش توفوردی به میزان ۱/۵ لیتر در هکتار به صورت پس‌رویشی (در مرحله ۶ برگی سورگوم) مصرف شد. همچنین طی فصل رشد، مزرعه با حمله آفات و بیماری‌ها مواجه نشد و نیازی به مصرف آفت‌کش نبود. آبیاری به صورت جوی و پشته‌ای (فارو) انجام شد و دور آبیاری طی دوره رویشی (از زمان کاشت تا ابتدای گلدهی) بر اساس ۶۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از سطح تشتک تبخیر کلاس A تنظیم شد. پس از شروع گلدهی نیز دور آبیاری بر اساس تیمارهای آزمایشی تنظیم گردید.

همان طور که بیان شد دور آبیاری بر اساس تبخیر تجمعی از سطح تشتک تبخیر کلاس A تنظیم گردید و پس از رسیدن میزان تبخیر تجمعی به ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌متر در تیمارهای آبیاری نرمال و کم‌آبیاری، عملیات آبیاری انجام شد. تشتک تبخیر مورداستفاده با قطر داخلی ۱۲۰/۶ و ارتفاع ۲۵/۴ سانتی‌متر که روی یک شبکه چوبی به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در داخل مزرعه نصب شده بود، به صورت روزانه بررسی و میزان تبخیر آن بر اساس کاهش ارتفاع آب از سطح مرجع بر حسب میلی‌متر قرائت می‌شد. سپس حجم آب تبخیرشده به تشتک اضافه می‌گردید تا سطح آب به خط مرجع (سطح نشانه) بازگردد. میزان تبخیر روزانه یادداشت و از زمان آبیاری قبلی تجمیع می‌شد تا به حد تعیین‌شده در تیمارهای آزمایشی برسد و سپس عملیات آبیاری انجام می‌گردید (خزائی و فومن ۲۰۱۲). پس از رسیدن نوبتِ هر آبیاری، رطوبت خاک به‌وسیله دستگاه تی.دی.آر اندازه‌گیری شد و حجم آب مورد نیاز، بر اساس اختلاف بین رطوبت خاک و حد ظرفیت زراعی برآورد گردید و با توجه به مساحت کرت‌های آزمایشی در تیمار مربوطه، حجم آب آبیاری برای بازگرداندن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی محاسبه شد. مقدار آب آبیاری لازم برای بازگرداندن رطوبت خاک به نقطه ظرفیت زراعی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (افشار و همکاران ۲۰۱۴):

$$V_w = (\theta_{FC} - \theta_i) \times D \times A \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن V_w حجم آب مصرفی در هر دور آبیاری (بر حسب مترمکعب)، θ_{FC} محتوای حجمی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی (بر حسب درصد)، θ_i محتوای حجمی رطوبت خاک قبل از آبیاری (بر حسب درصد)، D عمق مؤثر عمودی ریشه (بر حسب متر) و A مساحت کرت‌های آزمایشی در تیمار مربوطه (بر حسب مترمربع) بود (افشار و همکاران ۲۰۱۴). عمق مؤثر عمودی ریشه با حفر پروفیل به صورت ماهانه تعیین شد و حد ظرفیت زراعی بر اساس نتایج آنالیز خاک معادل با ۲۳ درصد بود. میزان آب مصرفی در هر تیمار و در هر نوبت با کمک شیرهای قطع و وصل و با استفاده از کنتور حجمی به کرت‌های آزمایشی در تیمار مربوطه اضافه شد (بغدادی و همکاران ۲۰۲۱). به طور کلی در رژیم‌های آبیاری نرمال، کم‌آبیاری و قطع آبیاری به‌ترتیب ۴۵۵۱، ۳۶۸۵ و ۲۹۷۷ مترمکعب آب در هکتار طی کل دوره فصل رشد مصرف شد. برداشت دانه در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی، مصادف با نیمه دوم شهریور ماه (بر اساس طول دوره رسیدگیِ متفاوت ژنوتیپ‌ها) انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	پتاسیم ($mg.kg^{-1}$)	فسفر ($mg.kg^{-1}$)	نیتروژن (٪)	ماده آلی (٪)	اسیدیته	بافت خاک	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)
۱/۳۹	۲۵۵	۶/۳	۰/۰۴	۰/۴۴	۷/۳	لومی	۳۷	۳۹	۲۴

در این آزمایش صفات عملکرد بیولوژیکی، عملکرد دانه، دمای کانوپی، هدایت روزنه‌ای، محتوی کلروفیل، قندهای محلول، پرولین، شاخص سطح برگ، پتانسیل اسمزی و محتوای آب نسبی برگ اندازه‌گیری شدند. تعیین دمای کانوپی براساس اندازه‌گیری امواج مادون قرمز و عکس‌برداری از مزرعه در میانه روز، ۲۱ روز پس از گل‌دهی با استفاده از دستگاه تفنگ حرارتی Portable Thermal Imager IVN-770-P (IMPAC Infrared GmbH) انجام شد. به منظور بررسی هدایت روزنه‌ای از دستگاه پرومتر AP4 استفاده شد. بدین منظور ۲۱ روز پس از مرحله‌ی گل‌دهی، قسمت میانی برگ پرچم در محفظه دستگاه قرار گرفت و پس از مدت ۳۰ ثانیه، عدد دستگاه یادداشت شد. جهت بررسی محتوای کلروفیل برگ از دستگاه کلروفیل‌متر دستی SPAD-502 استفاده شد و ۲۱ روز پس از گل‌دهی، بخش‌های نوک، میانه و قاعده برگ انتهایی توسط دستگاه مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس میانگین سه نقطه محاسبه شد. شاخص سطح برگ با استفاده از دستگاه سطح برگ سنج پرتابل LP-80 (PAR/LAI/Ceptometer, AccuPAR) در ۲۱ روز پس از گل‌دهی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پتانسیل اسمزی، پس از نمونه‌برداری، بلافاصله برگ‌ها در داخل کاغذ فویل توسط ازت مایع منجمد گردید و به فریزر ۸۰- انتقال داده شد تا در زمان مناسب نسبت به اندازه‌گیری اقدام شود. از دستگاه اسمومتر مدل Wescor-5520 برای تعیین پتانسیل اسمزی استفاده شد. جهت اندازگیری محتوای آب نسبی برگ پس از نمونه‌برداری از آخرین برگ توسعه یافته و اندازه‌گیری وزن‌تر نمونه‌ها، تمامی نمونه‌ها در آب مقطر قرار داده شدند و به مدت ۲۴ ساعت در سردخانه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند، سپس وزن اشباع برگ‌ها اندازه‌گیری شد و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند و وزن خشک هر کدام اندازه‌گیری شد. در نهایت محتوای آب نسبی برگ با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$RWC= [(FW-DW)/(SW-DW)] \times 100 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در این معادله RWC محتوای آب نسبی برگ، FW وزن تر برگ بلافاصله پس از نمونه‌برداری، DW وزن خشک برگ پس از قرار گرفتن در آون و SW وزن اشباع برگ پس از قرار گرفتن در آب مقطر می‌باشد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از روش LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد اثر رژیم آبیاری، ژنوتیپ و برهمکنش آن‌ها بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود اما عملکرد بیولوژیکی تنها تحت تاثیر ژنوتیپ قرار گرفت (جدول ۲). بیشترین عملکرد دانه با ۸۹۹۴ کیلوگرم در هکتار مربوط به رقم کیمیا تحت آبیاری نرمال بود و رقم فومن تحت آبیاری نرمال با عملکرد دانه ۷۸۷۲ کیلوگرم در هکتار در رتبه دوم قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین عملکرد بیولوژیکی (۳۵۷۶۰ کیلوگرم در هکتار) نیز توسط رقم کیمیا حاصل شد (شکل ۱). تحت شرایط کم‌آبیاری و قطع آبیاری بیشترین عملکرد دانه توسط رقم فومن تولید شد. با افزایش شدت تنش خشکی عملکرد دانه در همه ژنوتیپ‌ها کاهش یافت ولی شدت این کاهش در ژنوتیپ‌ها یکسان نبود و کمترین افت عملکرد با افزایش شدت تنش در رقم فومن مشاهده شد (جدول ۳). به نظر می‌رسد مصرف متعادل آب طی مراحل مختلف نمو تحت آبیاری نرمال منجر به بهبود عملکرد دانه می‌گردد. همچنین بهره‌مندی بیشتر از امکانات محیطی در شرایط آبیاری کامل با افزایش طول دوره رسیدگی می‌تواند در ارتقاء کمی و کیفی محصول نقش به‌سزایی داشته باشد (رشدی و رضادوست ۲۰۰۵). مظاهری لقب و همکاران (۲۰۰۱) اظهار داشتند تنش خشکی ضمن کاهش سطح برگ و پیری زودرس موجب افت عملکرد دانه می‌گردد. تسریع در گل‌دهی و

کوتاه شدن دوره رشد به‌عنوان یکی از دلایل کاهش عملکرد گیاه مطرح می‌باشد (فرهادی و همکاران ۲۰۲۲). در نواحی خشک و نیمه خشک معمولاً سورگوم در دوره زایشی و مرحله بعد از گل‌دهی تحت تاثیر تنش کم‌آبی قرار می‌گیرد و عملکرد آن کاهش می‌یابد (کبده و همکاران ۲۰۰۱). اگرچه تنش خشکی در هر مرحله رشدی می‌تواند بر عملکرد دانه سورگوم تأثیر بگذارد، اما کمبود آب در دوره زایشی تأثیر شدیدتری بر عملکرد دانه دارد (آبرها و همکاران ۲۰۲۲). مطالعات نشان داده که تأثیر محیط بر عملکرد دانه سورگوم در مراحل زایشی بیشتر از دوره رویشی است (سرشاد و همکاران ۲۰۲۱). نتایج یک آزمایش دوساله روی ۳۰ رقم سورگوم نشان داد که تنش خشکی در مرحله پس از گل‌دهی می‌تواند عملکرد دانه را تا حدود ۵۰ درصد کاهش دهد (باتیستا و همکاران ۲۰۱۹). برتری عملکرد دانه رقم فومن تحت شرایط تنش خشکی می‌تواند با زودرسی این ژنوتیپ مرتبط باشد که اثرات منفی کم‌آبی بر رشد زایشی و تولید دانه را کاهش داده و با فرار از خشکی، دوره مواجه آن با تنش را کوتاه‌تر کرده است درحالی‌که تحت شرایط آبیاری نرمال، رقم کیمیا که متوسطرس می‌باشد (خزائی و همکاران ۲۰۱۹) توانسته از فراهمی آب و شرایط مطلوب محیطی طی دوره طولانی‌تری استفاده کند و عملکرد بیشتری تولید نماید (بادیگاناور و همکاران ۲۰۱۸).

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورفو فیزیولوژیکی در ارزیابی تحمل به خشکی ارقام و لاین‌های امیدبخش سورگوم دانه‌ای

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیکی	هدایت روزنه‌ای	شاخص سطح برگ	محتوی کلروفیل
بلوک	۲	۱۷۳۵۲۲۴	۱۷۰/۱۰	۲۸/۹۸	۰/۰۵۶	۳۹/۵۵
رژیم آبیاری	۲	۱۳۴۸۳۰۴**	۳۹۶/۱۰	۳۹۱۵۱**	۰/۰۲۰	۱۹۴۰**
خطای کرت اصلی	۴	۷۲۴۳۶۳/۹	۹۸/۳۲	۱۱۶/۷	۰/۰۲۴	۲۱/۹۰
ژنوتیپ	۴	۱۰۱۴۳۲۱۳**	۸۰/۱۹**	۲۴۲۷**	۰/۰۲۳	۲۰۵/۳**
رژیم آبیاری×ژنوتیپ	۸	۱۰۲۳۲۰۵**	۱۵/۱۹	۱۳۶۴**	۰/۰۲۶	۶۱/۱۹**
خطای آزمایشی	۲۴	۱۶۵۴۴۳	۱۰/۶۸	۴۰/۵۸	۰/۰۳۸	۱۰/۷۹

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		پتانسیل اسمزی	قندهای محلول	پرولین	دمای کانوپی	محتوای نسبی آب برگ
بلوک	۲	۰/۰۶۰	۲۵/۷۲	۰/۰۰۶	۱/۸۶۶	۰/۰۰۳
رژیم آبیاری	۲	۰/۴۳۵**	۱۴۰/۷۵*	۰/۰۳۲**	۱۳۵/۸**	۰/۰۳**
خطای کرت اصلی	۴	۰/۰۰۳	۲۱/۶۶	۰/۰۰۴	۱/۵۸۱	۰/۰۰۲
ژنوتیپ	۴	۰/۰۸۷	۲۳/۳۱	۰/۰۰۷**	۲/۶۸۸*	۰/۰۲**
رژیم آبیاری×ژنوتیپ	۸	۰/۰۱۹	۶۰/۷۰*	۰/۰۰۱	۰/۴۸۴	۰/۰۰۵*
خطای آزمایشی	۲۴	۰/۰۶۷	۲۵/۴۶	۰/۰۰۲	۰/۸۷۷	۰/۰۰۲

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می باشد.

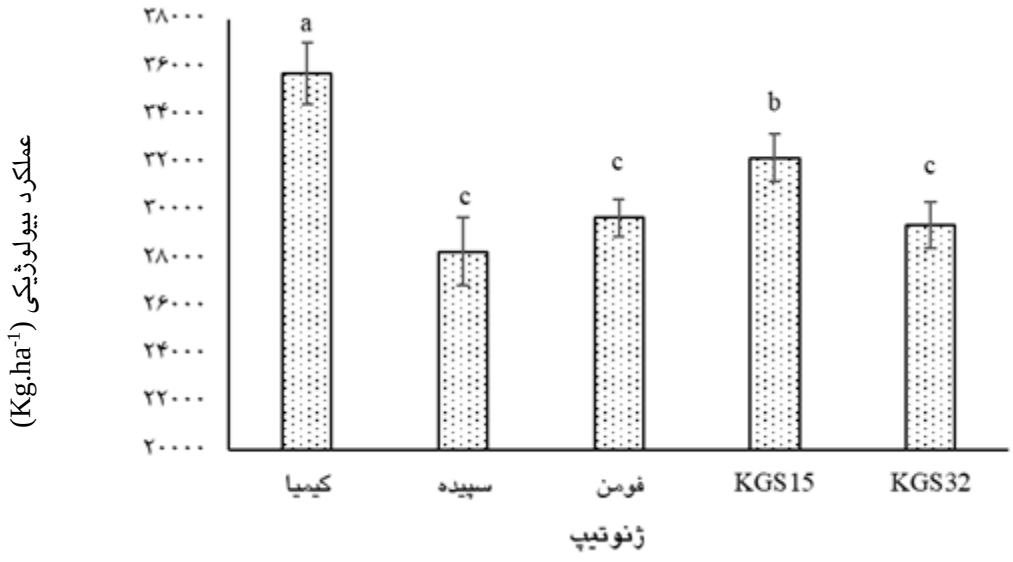
اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر هدایت روزنه‌ای در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). رقم کیمیا تحت آبیاری نرمال دارای بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای بود (جدول ۳). به‌طورکلی در شرایط تنش رقم فومن بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای و کمترین درصد کاهش در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال را به خود اختصاص داد. رقم کیمیا نیز کمترین میزان تغییرات در این صفت را پس از رقم فومن از خود نشان داد (جدول ۳). بسته شدن روزنه‌ها اولین پاسخ به تنش خشکی با تأثیر هورمون اسید آبسزیک است، ولی این بسته شدن می‌تواند تبادلات گازی لازم برای فتوسنتز و تولید گیاه را محدود کند. مطالعات نشان می‌دهد ارقام متحمل به خشکی نسبت به ارقام حساس در شرایط تنش و در شرایط مشابه از هدایت روزنه‌ای بالاتری برخوردارند.

این باز بودن روزنه‌ها می‌تواند نشان‌دهنده سیستم ریشه‌ای گسترده‌تر (و جذب آب بیشتر) و یا تنظیم اسمزی بهتر (برای کارایی جذب بیشتر آب) باشد که از استراتژی‌های اجتناب به شمار می‌روند (کوشمن و بورلند ۲۰۰۳). نتایج حاضر دال بر ترازمندی بهتر ارقام فومن و کیمیا نسبت به سه ژنوتیپ دیگر می‌باشد. این دو رقم در شرایط تنش از میزان عملکرد دانه بالاتری نیز برخوردار بودند (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات مورفوفیزیولوژیکی در ارزیابی تحمل به خشکی در ارقام و لاین‌های سورگوم دانه‌ای

تیمارهای آزمایشی		عملکرد دانه ($Kg.ha^{-1}$)	هدایت روزنه‌ای ($mmole.m^{-2}.s^{-1}$)	محتوی کلروفیل	قندهای محلول ($mg.g^{-1}$)	محتوی نسبی آب برگ (%)
رژیم آبیاری	ژنوتیپ					
آبیاری نرمال	کیمیا	۸۹۹۴ a	۲۴۰/۵ a	۴۹/۵ ab	۱۲/۷ c	۷۹ a
	سپیده	۷۳۱۴ bc	۱۶۳/۱ c	۴۹/۰ ab	۱۴/۰ c	۶۸ b
	فومن	۷۸۷۲ b	۱۸۵/۷ b	۵۱/۵ a	۱۶/۳ c	۷۱ a
	KGS15	۶۵۹۷ cde	۱۷۱/۰ c	۵۴/۵ a	۱۶/۵ c	۷۴ a
	KGS32	۵۶۲۸ fg	۱۹۳/۸ b	۵۱/۵ a	۱۴/۰ c	۶۷ c
کم‌آبیاری	کیمیا	۶۶۹۲ cd	۱۲۰/۷ f	۴۴/۰ bc	۱۸/۷ bc	۷۵ ab
	سپیده	۶۲۲۲ def	۱۱۶/۶ gf	۲۶/۰ edf	۱۷/۸ bc	۶۳ d
	فومن	۷۶۳۳ b	۱۴۴/۱ d	۳۹/۰ c	۱۲/۳ c	۶۷ b
	KGS15	۵۶۷۸ fg	۸۹/۶ i	۴۴/۵ bc	۱۹/۳ ab	۷۲ a
	KGS32	۴۵۱۴ h	۱۳۱/۸ e	۳۹/۶ c	۱۵/۵ c	۶۰ e
قطع آبیاری	کیمیا	۵۴۲۲ g	۱۰۸/۸ gh	۳۸/۵ c	۱۵/۵ c	۶۶ cde
	سپیده	۵۸۶۷ efg	۷۷/۲ j	۲۰/۲ f	۱۵/۳ c	۶۵ de
	فومن	۶۲۷۵ def	۱۰۶/۹ gh	۳۱/۳ d	۲۸/۱ a	۵۶ f
	KGS15	۵۸۱۷ fg	۱۰۰/۰ hi	۲۸/۳ ed	۱۸/۴ bc	۶۵ de
	KGS32	۳۶۰۸ i	۶۴/۲ k	۲۴/۲ ef	۲۶/۳ ab	۶۵ de

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک طبق آزمون LSD در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.



شکل ۱- مقایسه میانگین عملکرد بیولوژیکی در ارقام و لاین‌های سورگوم دانه‌ای

حروف مشترک طبق آزمون LSD در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر محتوی کلروفیل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). با افزایش شدت تنش خشکی، محتوی کلروفیل در همه ژنوتیپ‌ها به طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۳). هر چند بیشترین محتوی کلروفیل در لاین KGS15 تحت آبیاری نرمال ثبت گردید ولی سایر ژنوتیپ‌ها نیز در این سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری با لاین مذکور نداشتند. حداقل محتوی کلروفیل نیز توسط رقم سپیده و تحت تیمار قطع آبیاری حاصل شد (جدول ۳). کاهش سبزینگی در گیاهان تحت تنش خشکی می‌تواند به علت تغییر در نسبت لیپید پروتئین در کمپلکس‌های رنگیزه-پروتئین یا افزایش فعالیت کلروفیلاز باشد. نتایج تحقیقات در این رابطه نشان داده که با کاهش پتانسیل آب برگ فعالیت کلروفیلاز به طور ناگهانی زیاد می‌شود (ردی و همکاران ۲۰۰۴). نتایج به دست آمده با گزارش‌هایی که مبنی بر کاهش میزان سبزینگی در شرایط تنش خشکی و یا شوری در گونه‌های مختلف گیاهی است مطابقت دارد. کاهش معنی‌دار کلروفیل و رنگیزه‌های کل تحت تنش خشکی، می‌تواند با کمبود آب و صدمات وارده به کلروپلاست‌ها توسط گونه‌های فعال اکسیژن مرتبط باشد (آگاستین و همکاران ۲۰۰۰). یکی از راهکارهای گیاهان برای کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن، افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز است که باعث تجزیه کلروفیل می‌شود، در نتیجه میزان کلروفیل کاهش می‌یابد. بنابراین یکی از دلایل سبزمانی گیاهان مقاوم به خشکی از جمله سورگوم می‌تواند تولید کمتر گونه‌های فعال اکسیژن در این گیاهان باشد (لوچه و همکاران ۲۰۱۵). گیاهان با سبزمانی بیشتر، فتوسنتز بیشتری در برگ‌ها و ساقه‌های خود انجام می‌دهند (ردی و همکاران ۲۰۰۴). سبزمانی بوته سورگوم تحت شرایط تنش در مرحله پرشدن دانه از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌توان از آن به‌عنوان یکی از شاخص‌های تحمل به خشکی در غربال‌گری ژنوتیپ‌ها استفاده نمود (خزائی و همکاران ۲۰۱۹).

اثر رژیم آبیاری بر پتانسیل اسمزی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). به طوری که آبیاری نرمال دارای بیشترین پتانسیل اسمزی بود و با افزایش شدت تنش میزان پتانسیل اسمزی کاهش یافت (جدول ۴). رقم فومن به‌عنوان ژنوتیپ متحمل از کاهش شدت پتانسیل اسمزی کمتری برخوردار بود. این لاین با کارآیی جذب آب بیشتر که به‌صورت میزان هدایت روزنه‌ای بیشتر و دمای کانوپی پائین‌تر نمود پیدا کرد، به‌نظر می‌رسد با سازوکار اجتناب، از تنش کم‌آبی در گیاه کاسته است. در مقابل رقم کیمیا که به‌عنوان ژنوتیپ متحمل دیگر در این پژوهش که دارای عملکرد نسبتاً مطلوبی در شرایط تنش بود از طریق کاهش پتانسیل اسمزی و افزایش تجمع اسمولیت‌هایی مانند قندهای محلول و اسید آمینه پرولین (جدول ۳) قدرت جذب آب خود را افزایش داده است. نتایج آزمایش حاضر با نتایج ارائه شده توسط اوگباگا و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. ایشان نشان دادند که تنش خشکی در سورگوم منجر به افزایش غلظت قندهای محلول در ژنوتیپ سامسورگ-۱۷ و ارتقای محتوی اسیدهای آمینه در ژنوتیپ سامسورگ-۴۰ شد و در نتیجه‌ی تجمع مواد محلول سازگار، پتانسیل اسمزی در هر دو ژنوتیپ کاهش یافت. مواد محلول سازگار علاوه بر تسهیل جذب و نگهداری آب درون سلول‌ها، از غشا، کلروپلاست و اندامک‌ها در برابر اثرات منفی تنش خشکی محافظت می‌کنند. هر چند بیوسنتز این مواد می‌تواند با صرف انرژی موجب کاهش نرخ رشد شود (سرشاد و همکاران ۲۰۲۱، آبرها و همکاران ۲۰۲۲).

جدول ۴- اثر رژیم آبیاری بر پتانسیل اسمزی، محتوی پرولین و دمای کانوپی سورگوم دانه‌ای

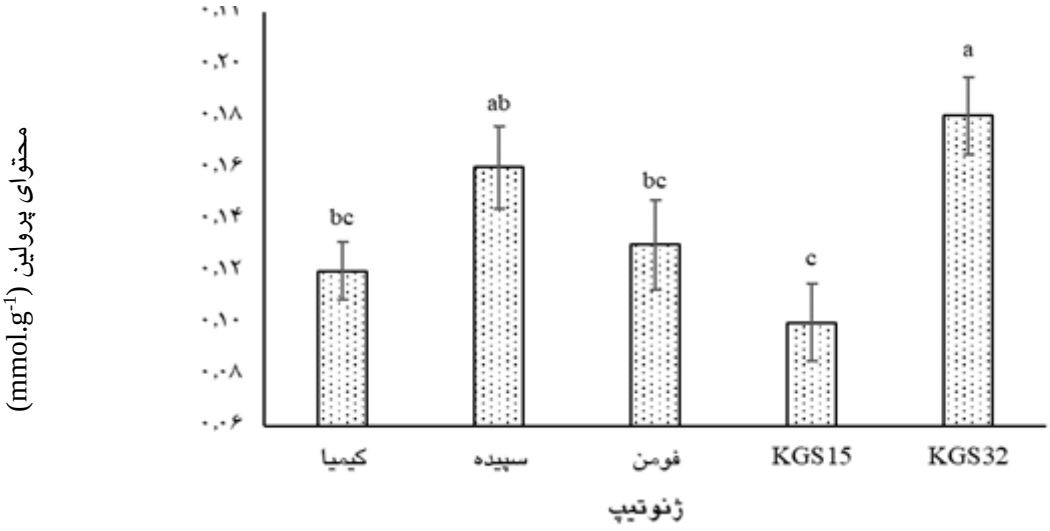
رژیم آبیاری	پتانسیل اسمزی (MPa)	محتوی پرولین ($mmole.g^{-1}$)	دمای کانوپی (^oC)
آبیاری نرمال	-۱/۲ a	۰/۰۹ b	۲۸/۴ b
کم‌آبیاری	-۱/۳ b	۰/۱۴ ab	۳۳/۱ a
قطع آبیاری	-۱/۵ c	۰/۱۹ a	۳۴/۰ a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک طبق آزمون LSD در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل ژنوتیپ و رژیم آبیاری بر محتوی قندهای محلول معنی‌دار بود (جدول ۲). ترکیبات تیماری قطع آبیاری با رقم فومن و لاین KGS32 دارای بیشترین محتوی قند محلول بودند (جدول ۳). لوباتو و همکاران (۲۰۰۸) و ایمپا و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی محتوی قندهای محلول افزایش می‌یابد. مکانیسم‌های تحمل تنش خشکی با تجمع اسموپروتکتانت‌هایی همچون قندهای محلول مرتبط می‌باشد. میزان سوکروز در گیاهان تحت تنش خشکی به‌علت افزایش بیوسنتز آن افزایش می‌یابد؛ این افزایش احتمالاً توسط فعالیت آنزیم سوکروزفسفات سنتاز به منظور حفاظت از غشاء سلولی تسریع می‌شود (هوکسترا و همکاران ۲۰۰۱، آبرها و همکاران ۲۰۲۲). باالزاده و همکاران (۲۰۲۱) به این نتیجه رسیدند که گیاهانی که رطوبت کمتری دریافت می‌کنند، محتوی قندهای محلول بیشتری دارند. محتوی بالای قندهای محلول در گیاهان پتانسیل اسمزی بالاتری ایجاد می‌کند و جذب آب را در شرایط تنش خشکی افزایش می‌دهد. این تنظیم اسمزی، مکانیسم فیزیولوژیکی در پاسخ به محدودیت آب است (آبرها و همکاران ۲۰۲۲) که در این مطالعه نیز مشاهده شد.

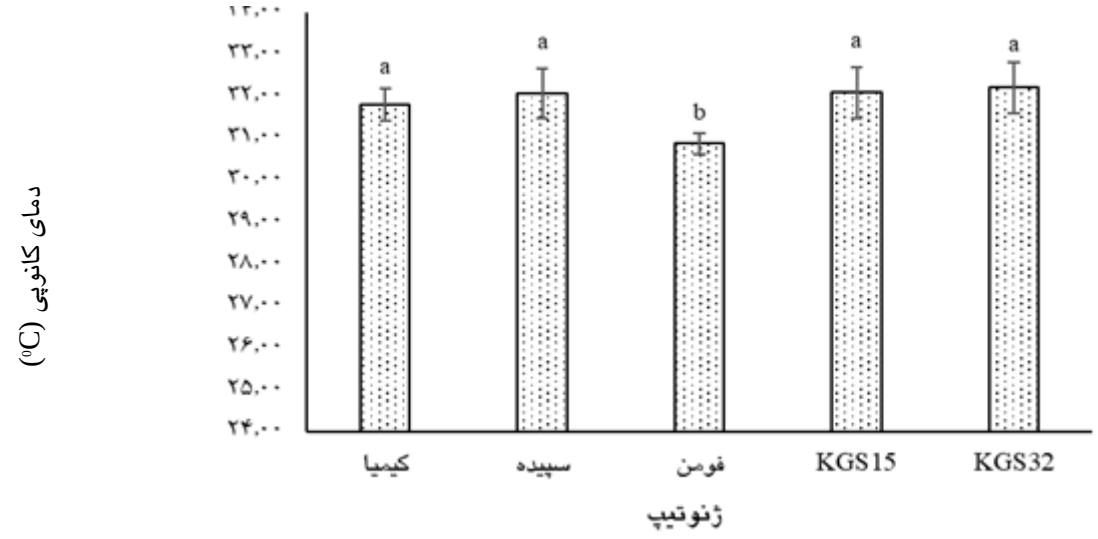
اثر رژیم آبیاری بر محتوی پرولین نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲)، به طوری که بیشترین میزان پرولین تحت تیمار قطع آبیاری ثبت گردید (جدول ۴). ارقام و لاین‌ها از نظر محتوی پرولین در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری داشتند (جدول ۲)، به طوری که بیشترین میزان پرولین در لاین KGS32 مشاهده شد (شکل ۲). در شرایط تنش خشکی محتوی نسبی آب برگ نیز کاهش می‌یابد چون که در طی فتوسنتز مقداری از آب گیاه از طریق روزنه‌ها خارج می‌گردد (ورسلوس و همکاران ۲۰۰۶). از دست رفتن آب از بافت‌های گیاهی تحت شرایط تنش خشکی باعث بازدارندگی رشد می‌شود و تغییرات فیزیولوژیکی شامل تجمع آبسزیک اسید، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و افزایش در یون‌های پتاسیم و کلر را به دنبال دارد (بوررل و همکاران ۲۰۰۱). به‌طورکلی تنش‌های محیطی به ویژه تنش خشکی، تجمع کربوهیدرات‌های محلول، پرولین و اسیدهای آمینه آزاد را افزایش می‌دهد. این محلول‌ها وزن مولکولی کمی دارند و در غلظت‌های بالا نیز فاقد سمیت بوده و اجزای سلول را از صدمات دهیدراسیون محافظت می‌کنند (شائو و همکاران ۲۰۰۵). افزایش تجمع پرولین به عنوان یکی از شاخص‌های مهم تحمل به تنش خشکی در گیاهان عالی می‌تواند به‌علت کاهش فعالیت پرولین دهیدروژناز باشد (اشرف و ایرام ۲۰۰۵). ژو و زیونگ (۲۰۰۲) نیز بیان داشتند پرولین به‌عنوان تنظیم کننده اسمزی عمل می‌نمایید و مقاومت سلول‌ها را در شرایط تنش افزایش می‌دهد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر رژیم آبیاری بر دمای کانوپی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲) به طوری که با افزایش شدت تنش، دمای کانوپی هم افزایش پیدا کرد (جدول ۴). ارقام و لاین‌ها از لحاظ دمای کانوپی در سطح احتمال پنج درصد دارای تفاوت معنی‌داری بودند (جدول ۲)، به طوری که رقم فومن دارای پایین‌ترین دمای کانوپی بود و بعد از آن رقم کیمیا قرار داشت (شکل ۳). رقم فومن که در این بررسی هدایت روزنه‌ای بالاتری در شرایط تنش نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها از خود نشان داد، تحت تنش خشکی دمای کانوپی پائین‌تری نیز داشت. گلستانی و آساد (۱۹۹۸) بیان داشتند که دمای کانوپی می‌تواند به‌عنوان یک معیار گزینش ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی به کار رود. پایین‌تر بودن دمای برگ در ژنوتیپ‌های متحمل گیاهان زراعی نسبت به ژنوتیپ‌های حساس بیانگر ترازمندی آب بهتر در آن‌ها می‌باشد که خود ناشی از مکانیسم جذب آب بیشتر توسط ریشه‌ها و حفظ و نگهداری وضعیت آبی مناسب برگ‌ها بوده و نهایتاً باعث خنک شدن گیاه از طریق تعرق می‌شود و معیار مناسبی برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل از حساس می‌باشد (حسینی سالکده و همکاران ۲۰۰۹).



شکل ۲- مقایسه میانگین محتوی پرولین در ارقام و لاین‌های سورگوم دانه‌ای

حروف مشترک طبق آزمون LSD در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.



شکل ۳- مقایسه میانگین دمای کانوپی در ارقام و لاین های سورگوم دانه‌ای

حروف مشترک طبق آزمون LSD در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

اثر متقابل رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر محتوای نسبی آب برگ در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین محتوای نسبی آب برگ در رقم کیمیا تحت آبیاری نرمال ثبت شد (جدول ۳). محتوای نسبی آب برگ بالاتر، به معنی توانایی برگ در حفظ مقادیر بیشتری آب در شرایط تنش است. به نظر می‌رسد که محتوای نسبی آب برگ شاخص مناسبی برای گزینش در جهت مقاومت به خشکی در مقایسه با پتانسیل آب برگ باشد. در گیاهان، همبستگی مثبتی میان میزان نسبی آب برگ و میزان مواد محلول و متابولیت‌ها وجود دارد؛ بنابراین بالاتر بودن میزان نسبی آب برگ در شرایط تنش خشکی، به همراه بیشتر بودن مواد محلول و متابولیت‌ها سبب افزایش تحمل به تنش خشکی می‌شود (گرفل و همکاران ۲۰۰۸). با توجه

به نقش پروتئین و کلروفیل در حفظ فتوسنتز و مقاومت به خشکی، می‌توان از محتوای نسبی آب برگ به‌عنوان یک شاخص در جهت مقاومت به خشکی استفاده کرد. مدیریت آبیاری در مزرعه باید بر اساس محتوای نسبی آب برگ و نه آب خاک باشد. زمانی که محتوای نسبی آب برگ بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد باشد، بازدارندگی روزنه‌ای صورت گرفته که در این هنگام بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز قابل بازگشت می‌باشد. زمانی که محتوای نسبی آب برگ بین ۳۵ تا ۷۰ درصد باشد، بازدارندگی غیرروزنه‌ای نظیر بازدارنده نوری، کاهش کربوکسیلاسیون، چرخه کالوین و تنفس نوری رخ می‌دهد و انتقال الکترون نیز در این حالت عامل محدودکننده‌تری است و در این شرایط بازیافت به کندی صورت می‌گیرد. در محتوای نسبی آب برگ کمتر از ۳۰ درصد به غشای کلروپلاست صدمه وارد می‌شود و خسارت غیر قابل برگشت خواهد بود (کافی و مهدوی دامغانی ۲۰۰۱).

نتیجه‌گیری

در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد محتوی کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، پتانسیل اسمزی، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه تحت تنش خشکی نسبت به آبیاری نرمال کاهش یافت. از طرفی دمای کانوپی، محتوی اسید آمینه پرولین و قندهای محلول تحت تنش خشکی افزایش معنی‌داری نشان دادند. نکته جالب روند متفاوت تغییرات در ژنوتیپ‌های مورد بررسی می‌باشد که می‌تواند ما را در شناسایی ارقام و لاین‌های مقاوم به‌منظور استفاده در طرح‌های اصلاحی یاری نماید. به‌طورکلی در شرایط تنش رقم فومن بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای و کمترین درصد کاهش عملکرد در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال را به خود اختصاص داد. رقم کیمیا نیز کمترین میزان تغییرات در این صفت را پس از رقم فومن از خود نشان داد. علاوه بر این پائین‌ترین دمانی کانوپی تحت شرایط کم‌آبیاری و قطع آبیاری در رقم فومن ثبت گردید. بنابراین رقم فومن با هدایت روزنه‌ای بالاتر و دمای کانوپی پائین‌تر از کارآیی جذب آب بالاتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برخوردار بوده و به نظر می‌رسد با مکانیسم اجتناب از تنش خشکی، از شدت اثرات منفی کم‌آبی در گیاه کاسته است. در حالی که رقم کیمیا با افزایش تجمع اسمولیت‌ها و به دنبال آن کاهش پتانسیل اسمزی، پتانسیل جذب آب خود را ارتقا داد و توانست در شرایط تنش خشکی عملکرد قابل‌قبولی تولید نماید. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌توان بیان داشت که تنش خشکی آخر فصل می‌تواند بر عملکرد و برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی سورگوم تأثیر بگذارد. در مقابل این گیاه با تغییر در برخی مکانیسم‌های مرتبط به مقابله با اثرات منفی تنش خشکی می‌پردازد و از این نظر ژنوتیپ‌های مختلف سازوکارهای متفاوتی را اعمال می‌کنند. به طور کلی در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی در این پژوهش، عملکرد ارقام فومن و کیمیا کمتر تحت تأثیر تنش خشکی آخر فصل قرار گرفت.

سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری‌های مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در اجرای این پروژه تحقیقاتی با کد مصوب ۹۳۱۲۲-۰۳۰۵-۰۳-۳ سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

Abreha KB, Enyew M, Carlsson AS, Vetukuri RR, Feyissa T, Motlhaodi T, Nguni D and Geleta M. 2022. Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. Planta, 255: 20.

Afshar RK, Jovini MA, Chaichi MR and Hashemi M. 2014. Grain sorghum response to arbuscular mycorrhiza and phosphorus fertilizer under deficit irrigation. Agronomy Journal, 4: 1212-1218.

Agastian P, Kingsley SJ and Vivekanandan M. 2000. Effect of salinity on photosynthesis and biochemical characteristics in mulberry genotypes. Photosynthetica, 38: 287-290.

Anonymous. 2020. FAOSTAT Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Rome. Available at: https://www.fao.org/faostat/en/.

Ashoori N, Abdi M, Golzardi F, Ajali J and Ilkaee MN. 2021. Forage potential of sorghum-clover intercropping systems in semi-arid conditions. Bragantia, 80: e1421.

Ashraf M and Iram A. 2005. Drought stress induced changes in some organic substances in nodules and other plant parts of two potential legumes differing in salt tolerance. Flora, 200: 535-546.

Badigannavar A, Teme N, De Oliveira AC, Li G, Vaksmann M, Viana VE, Ganapathi T and Sarsu F. 2018. Physiological, genetic and molecular basis of drought resilience in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. Indian Journal of Plant Physiology, 23(4): 670-688.

Baghdadi A, Paknejad F, Golzardi F, Hashemi M and Ilkaee MN. 2021. Suitability and benefits from intercropped sorghum–amaranth under partial root-zone irrigation. Journal of the Science of Food and Agriculture, 101(14): 5918-5926.

Balazadeh M, Zamanian M, Golzardi F and Mohammadi Torkashvand A. 2021. Effects of limited irrigation on forage yield, nutritive value and water use efficiency of Persian clover (*Trifolium resupinatum*) compared to berseem clover (*Trifolium alexandrinum*). Communications in Soil Science and Plant Analysis, 52(16): 1927-1942.

Barkhori Mehani F, Kheiry A, Soleimani A, Sani Khani M and Arghavani M. 2021. Study of some morphophysiological characteristics in endemic population of *Nigella sativa* under water deficits stress in Zanjan climate conditions. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 31(3): 213-226. (In Persian).

Batista PSC, Caryalho AJ, Portugal AF, Bastos EA, Cardoso MJ, Torres LG, Juli MPM and De Menezes CB. 2019. Selection of sorghum for drought tolerance in a semiarid environment. Genetics and Molecular Research, 18 (1): 18194.

Bayoumi TY, Eid MH and Metwali EM. 2008. Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes. African Journal of Biotechnology, 7(14): 2341-2352.

Behtari B, Ghassemi-Golezani K, Dabbagh Mohammadi Nasab A, Zehtab Salmasi S and Toorchi M. 2009. Effect of water deficit on morphological traits and water use efficiency of two soybean (*Glycine max* L.) cultivars. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 20(4): 11-21. (In Persian).

Borrell AK, Hammer GL and Van Oosterom E. 2001. Stay-green: a consequence of the balance between supply and demand for nitrogen during grain filling? Annuals of Applied Biology, 138: 91-95.

Cushman JC and Borland AM. 2003. Induction of crassulacean acid metabolism by water limitation. Plant, Cell and Environtment, 25: 295-310.

Dabbagh Mohammadi Nasab A, Javanmard A and Arzheh J. 2017. Forage production in different intercropping patterns of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) with hairy vetch (*Vicia villosa*) in nitrogen fertilizer levels. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 27(1): 63-83. (In Persian).

Farhadi A, Paknejad F, Golzardi F, Ilkaee MN and Aghayari F. 2022. Effects of limited irrigation and nitrogen rate on the herbage yield, water productivity, and nutritive value of sorghum silage. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 53(5): 576-589.

Fathirezaee V, Shakiba M, Dabbagh Mohammadi Nassab A and Toorchi M. 2021. Evaluation of grain yield and some physiological characteristics of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under water deficit and molybdenum. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 31(2): 167-180. (In Persian).

Golestani AS and Assad MT. 1998. Evaluation of four Screening techniques for drought resistance and their relationship to yiehd reduction ratio in wheat. Euphytica, 103: 293-299.

Golzardi F, Vazan S, Moosavinia H and Tohidloo G. 2012. Effects of salt and drought stresses on germination and seedling growth of swallowwort (*Cynanchum acutum* L.). Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4(21): 4524-4529.

Guerfel M, Baccouri O, Boujnah D, Cha W and Zarrouk M. 2008. Impacts of water stress on gas exchange, water elations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. Scientia Horticulturae, 1: 1-7.

Hassan MU, Chattha MU, Barbanti L, Chattha MB, Mahmood A, Khan I and Nawaz M. 2019. Combined cultivar and harvest time to enhance biomass and methane yield in sorghum under warm dry conditions in Pakistan. Industrial Crops and Products, 132: 84-91.

Hoekstra FA, Golovina EA and Buitink J. 2001. Mechanism of plant desiccation tolerance. Trends in Plant Science, 6: 431-438.

Hosseini Salekdeh Gh, Reynolds M, Bennett J and Boyer, J. 2009. Conceptual framework for drought phenotyping during molecular breeding. Trends in Plant Science, 14: 488-496.

Impa SM, Perumal R, Bean SR, Sunoj VSJ and Jagadish SVK. 2019. Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum. Journal of Cereal Science, 86: 124-131.

Kaffi M and Mahdavi-Damghani V. 2001. The Mechanisms of Plant Tolerance to Drought Stress. Tabriz University Press.

Kaplan M, Kara K, Unlukara A, Kale H, Buyukkilic Beyzi S, Varol IS, Kizilsimsek M and Kamalak A. 2019. Water deficit and nitrogen affects yield and feed value of sorghum sudangrass silage. Agricultural Water Management, 218: 30-36.

Kebede H, Subudhi PK. Rosenow DT and Nguyen HT. 2001. Quantitative trait loci influencing drought tolerance in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). Theoretical and Applied Genetics, 103: 266-276.

Keikha M, Mahdinezhad N, Fakheri B and Mohamadi R. 2019. Drought stress tolerance mechanism and expression of genes involved in osmotic regulation in some wheat and wild crop species. Modern Genetics, 14(2): 111-123. (In Persian).

Khazaei A and Fouman A. 2012. Evaluation of drought tolerance in cultivars and advanced grain sorghum lines under low irrigation stress conditions. Journal of Crop Production, 5(3): 63-79. (In Persian).

Khazaei A, Sabouri A, Sadat Shobbar Z and Shahbazi M. 2017. Evaluating the relationships between grain yield and important agronomic traits in cultivars and promising lines of grain sorghum under non-stress and drought stress irrigation regimes. Cereal Research, 7(1): 129-141. (In Persian).

Khazaei A, Fouman A, Rahjoo V and Golzardi F. 2019. Sorghum Cultivation (Handbook). Agricultural Education Publication. (In Persian).

Khazaei A. 2020. Evaluation of yield of promising dual purpose grain-forage sorghum lines (*Sorghum bicolor* L. Moench) using drought tolerance indices. Iranian Journal of Crop Sciences, 22 (3): 275-290. (In Persian).

Khazaei A, Torabi M, Mokhtararpour H and Beheshti AR. 2020. Evaluation of yield stability of forage sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] genotypes using AMMI analysis. Iranian Journal of Crop Sciences, 21(3): 225-236. (In Persian).

Khazaei A, Torabi M, Fyzbakhsh MT and Azari Nasrabad A. 2021. Analysis of grain yield stability and assessment of genotype × environment interaction for grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) genotypes. Iranian Journal of Crop Sciences, 23(3): 211-222. (In Persian).

Lobato AKS, Oliveira CF and Costa RCL. 2008. Biochemical and physiological behavior of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Under water stress during the vegetative phase. Asian Journal of Plant Sciences, 7: 44-49.

Luche HDS, Da Silva JAG, Da Maia, LC, De Oliveira, AC. 2015. Stay-green: a potentiality in plant breeding. Ciência Rural, 45(10): 1755-1760.

Mazaherilaghab H, Nori F, Zare-Abyane H and Vafaei H. 2001. Effect of final irrigation on important traits of three varieties of sunflower in dry land farming. Iranian Journal of Agricultural Research, 1: 41-44. (In Persian).

Mirahki I, Ardakani MR, Golzardi F, Paknejad F and Mahrokh A. 2021. Biomass production, water use efficiency and nutritional value parameters of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes as affected by seed hydro-priming and transplanting. Acta Biologica Szegediensis, 65(2): 171-184.

Ogbaga CC, Stepien P, Dyson BC, Rattray NJW, Ellis DI, Goodacre R and Johnson GN. 2016. Biochemical analyses of sorghum varieties reveal differential responses to drought. PLoS ONE, 11(5): e0154423.

Reddy AR, Chaitanya KV and Vivekanandan M. 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. Journal of Plant Physiology, 161: 1189-1202.

Roshdi M and Rezadost S. 2005. Study of different irrigation levels on qualitative and quantities traits of sunflower. Iranian Journal of Agricultural Sciences and Natural Resource, 46(5): 1241-1250 (In Persian).

Sarshad A, Talei D, Torabi M, Rafiei F and Nejatkhah P. 2021. Morphological and biochemical responses of *Sorghum bicolor* (L.) Moench under drought stress. SN Applied Sciences, 3: 81.

Shao HB, Liang ZS Shao MA. 2005. Change of antioxidative enzymes and MDA among 10 wheat genotypes at maturation stage under soil water deficits. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 45(2): 7-13.

Verslues PE, Agarwal M and Jian-Kang Z. 2006. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. The Plant Journal, 45: 523-539.

Zhu JK and Xiong L. 2002. Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. Plant, Cell and Environment, 25: 131-139.