آثار تنش کم‌آبی در مرحله زایشی بر ارقام مختلف سورگوم علوفه‌ای

فاطمه ابراهیمی[1*]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۷)

چکیده

سورگوم از مهم‌ترین گیاهان علوفه‌ای با پتانسیل تولید بالا، قابل کشت در خاک‌های فقیر و دارای سازگاری زیاد در برابر تنش‌ها است. به‌منظور بررسی اثر تنش کم‌آبی، پتانسیل تولید و روابط صفات مهم در سورگوم علوفه‌ای، ۳۶ ژنوتیپ در قالب طرح لاتیس ۶× ۶ تحت شرایط تنش کم‌آبی در اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۹در مزرعه پژوهشی دانشگاه شهید باهنر کرمان کشت شد. اعمال تنش در مرحله آغاز خوشه‌دهی در ۸۵ درصد تخلیه آب قابل استفاده خاک انجام شد و در شرایط بدون تنش در ۵۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده خاک، آبیاری انجام شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد تنش کم‌آبی عملکرد علوفه تر و ارتفاع بوته را به‌ترتیب به میزان ۴۴/۸ و ۱۸/۳ درصد کاهش داد. ارقام unl Hybrid3، Wray، Speed Feed و Smith بیش‌ترین عملکرد علوفه تر در شرایط مطلوب و تنش رطوبتی دارا بودند. مقایسه میانگین بر اساس شاخص‌های میانگین تولید (MP)، شاخص عملکرد (YI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) و شاخص تحمل به تنش (STI)، و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای شاخص‌های تحمل نشان داد ارقام unl Hybrid3، Speed Feed، Wray، Smith، ICSV25264 و Dale به‌عنوان ارقام متحمل و با پتانسیل زیاد عملکرد در هر دو شرایط رطوبتی بودند. بر اساس نتایج تجزیه مسیر، ارتفاع بوته و قطر ساقه به‌ترتیب در شرایط بدون تنش و تنش کم‌آبی بیش‌ترین اثر مستقیم را بر عملکرد علوفه داشتند و بیش‌ترین اثر غیرمستقیم را این صفات به‌ترتیب از طریق قطر ساقه و ارتفاع بوته بر عملکرد علوفه سورگوم اعمال کردند. به‌طور کلی تنش کم‌آبی در سطح ۸۵ درصد تخلیه آب قابل استفاده خاک در مرحله رشد زایشی سورگوم علوفه‌ای منجر به کاهش رشد و عملکرد علوفه شد. تنوع کافی در ژرم‌پلاسم مورد بررسی از لحاظ پاسخ به تنش کم‌آبی و گزینش ارقام متحمل وجود دارد. ارقام متحمل با پتانسیل عملکرد زیاد در ژرم‌پلاسم مورد بررسی برای توسعه کشت در مناطق با محدودیت منابع آبی و صفات مؤثر بر عملکرد برای بهبود عملکرد پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: عملکرد علوفه تر، ذرت خوشه‌ای، شاخص‌های تحمل، مرحله خوشه‌دهی.

مقدمه

علیرغم بارز بودن جایگاه گیاهان علوفه‌ای در تأمین خوراک دام، تولید و مدیریت این گیاهان در مقایسه با سایر گیاهان زراعی در ایران چندان مورد توجه نبوده است و به‌علت عدم توجه به افزایش کمی و کیفی گیاهان علوفه‌ای، کشور همواره با کمبود مواد پروتئینی روبه‌رو بوده است. بنابراین اهتمام به کشت محصولات علوفه‌ای با توجه به نیاز کشور به فرآورده‌های دامی و لبنی ضروری به نظر می‌رسد. به این منظور باید به دنبال گیاهانی بود که علاوه بر میزان عملکرد زیاد، دارای کیفیت مطلوبی نیز باشند (۱۰). ذرت خوشه‌ای یا

۱- پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: fa.ebrahimi@uk.ac.ir

سورگوم با داشتن ویژگی‌هایی از جمله پتانسیل تولید زیاد علوفه و دانه، مصرف بهینه آب و تحمل زیادی به کم‌آبی، قابلیت کشت در طیف وسیعی از خاک‌های زراعی ایران، و مقاومت زیاد در برابر شوری، قلیائیت آب و خاک، تنش غرقابی و سمیّت آلومینیوم از مهم‌ترین گیاهان علوفه‌ای موجود محسوب می‌شود. این گیاه مناسب کشت در شرایط آب و هوایی ایران و سازگاری با شرایط نامساعد اقلیمی (به جز سرما) است. علاوه بر این سورگوم دارای تنوع مصرف علوفه به‌صورت سیلوئی، علوفه تر، علوفه خشک و چرای مستقیم است و امکان برداشت علوفه در زمان‌های مختلف با توجه به وضعیت عرضه و تقاضا در سورگوم وجود دارد. به لحاظ ارزش غذایی دام نیز سورگوم با سایر علوفه‌ها برابری می‌کند (۳۱ و ۳۷).

با توجه به قرارگیری ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک دنیا، مسئله تنش خشکی و آثار آن بر محصولات زراعی بیش از هر تنش غیرزیستی دیگری می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. تنش خشکی یک مشکل جهانی است که بر رشد محصولات زراعی تاثیر شگرفی داشته و برای امنیت غذایی خطرآفرین است (۱۹). عکس‌العمل گیاه نسبت به تنش کم‌آبی به مرحله‌ای از رشد بستگی دارد که تنش در آن صورت می‌گیرد (۱۳). تنش کم‌آبی پس از گرده‌افشانی و در اواخر فصل رشد سبب نقصان چشمگیر عملکرد می‌شود. زمان بروز تنش خشکی در نوع و میزان خسارت وارده آثار زیادی دارد. گیاه سورگوم می‌تواند در شرایط تنش در صورت وجود رطوبت کافی در مرحله خوشه دهی و گلدهی قابلیت تولید زیادی داشته باشد (۲۸). پژوهش انجام شده روی ارزن و سورگوم نشان داد که تنش در مرحله رشد زایشی تا ۵۰ درصد عملکرد دانه را کاهش داده، اما بروز تنش در مرحله رشد رویشی در ارزن ۲۵ درصد و در سورگوم ۳۰ درصد عملکرد را کاهش داد (۳۰). تنش کمبود آب با تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیک، و رشد و نمو بافت‌های گیاهی منجر به کاهش زیست‌توده و در نهایت کاهش عملکرد می‌شود (۲۷).

عملکرد صفتی پیچیده و پلی‌ژنی بوده که با صفات وابسته و اجزای عملکرد همبستگی دارد. وراثت‌پذیری صفاتی مانند عملکرد در شرایط محیطی خشک کم است. از آنجایی که اندازه‌گیری صفات اجزای عملکرد ساده بوده و نیز از توارث‌پذیری نسبتاً زیادی برخوردارند، گزینش بر اساس چنین صفاتی روشی سریع و مطمئن برای غربال جوامع گیاهی برای بهبود عملکرد است (۲۳ و ۳۶). رابطه خطی بین صفات را می‌توان توسط ضرایب همبستگی بررسی کرد. اما تجزیه ضرایب مسیر با بررسی روابط بین صفات، سهم هر کدام از آن‌ها را نیز به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تعیین و برآورد می‌کند (۳۴).

در مطالعه ارزیابی تحمل به تنش کم‌آبی در لاین‌های امیدبخش سورگوم علوفه‌ای شاخص‌های تحمل تنش[1] (STI)، میانگین هندسی بهره‌وری[2] (GMP) و میانگین تولید[3] (MP) با همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد علوفه در شرایط تنش و بدون تنش، به‌عنوان معیارهای مناسب برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کم‌آبی شناخته شدند و لاین KFS3 با بیشترین مقدار STI در نمودار بای‌پلات در ناحیه با پتانسیل تولید زیاد و حساسیت به کم‌آبی کم قرار گرفت (۲۱). نتایج تجزیه علیت در بررسی روابط عملکرد دانه با صفات گیاهی مرتبط با عملکرد در ژنوتیپ‌های سورگوم دانه‌ای در شرایط تنش کم‌آبی نشان داد که وزن دانه، تعداد دانه در خوشه و وزن خشک ساقه به‌ترتیب در شرایط بدون تنش، تنش در مرحله رویشی و تنش در مرحله زایشی بیش‌ترین اثر مستقیم را در ایجاد تغییرات عملکرد دانه داشتند و بیش‌ترین اثر غیرمستقیم مثبت و منفی آن‌ها به‌ترتیب از طریق تعداد دانه در خوشه، وزن بذور در خوشه، قطر ساقه، مساحت برگ پرچم و ارتفاع بوته بر عملکرد دانه اعمال کردند (۳۴).

سورگوم گیاهی مقاوم به خشکی است و در دوره‌های شدید خشکی، بدون اینکه به روزنه‌های برگ آسیبی برسد رشد آن متوقف شده و پس از بارندگی یا آبیاری، فرایند رشد دوباره از

1. Stress tolerance index
2. Geometric mean productivity
3. Mean productivity

سر گرفته می‌شود. با این‌حال تنش کم‌آبی یا عدم مدیریت صحیح آبیاری، میزان عملکرد سورگوم را کاهش می‌دهد (۱). درحالی که با توجه به بحران آب در کشور و سیاست‌های وزارت کشاورزی، لازم است بخش قابل توجهی از علوفه مورد نیاز کشور از گیاهان کم‌آب‌بر همچون سورگوم تأمین شود. بنابراین لازم است پژوهش‌های لازم در راستای بررسی اثر تنش کم‌آبی بر رشد گیاه در ژنوتیپ‌های متعدد انجام شود و با انتخاب صفات مؤثر بر عملکرد اقدام به گزینش ارقام و در نهایت توسعه ارقام با عملکرد زیاد تحت شرایط تنش کم‌آبی کرد. این پژوهش با هدف بررسی اثر تنش کم‌آبی در مرحله رشد زایشی، تعیین ارقام سورگوم علوفه‌ای متحمل به تنش کم‌آبی با پتانسیل عملکرد زیاد و شناسایی صفات دارای ارتباط قوی و مؤثر با عملکرد علوفه تر در سورگوم علوفه‌ای تحت شرایط تنش کم‌آبی انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ۳۶ رقم سورگوم علوفه‌ای (جدول ۱) به‌صورت طرح لاتیس ۶ ×۶ با دو تکرار در دو شرایط غیرتنش و تنش رطوبتی در اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۹ در مزرعه پژوهشی دانشگاه شهید باهنر کرمان با مشخصات طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی، عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی دارای اقلیم خشک و معتدل مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم به عمق ۴۵ سانتی‌متر، دیسک و تسطیح انجام شد. همچنین براساس آزمون خاک به مقدار ۲۰۰ کیلو گرم کود اوره، ۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم در هکتار پیش از کاشت به زمین داده شد. هر رقم در هر تکرار به طول ۴ متر کشت شد، به‌طوری که فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کنترل علف‌های هرز در طول فصل رشد با دست انجام گرفت.

جدول ۱. ارقام سورگوم علوفه‌ای استفاده شده در این پژوهش.

Table 1. Forage sorghum cultivars used in this study.

نام رقم Cultivar Name	شماره Number	نام رقم Cultivar Name	شماره Number
Memoniate	19	IS 39431	1
N98	20	ICSV 25264	2
Wray	21	IS 23574	3
Dale	22	ICSB 2	4
Keller	23	ICSR 137	5
M 816	24	ICSR 82	6
Speed Feed	25	ICSR 59	7
EU G/542F	26	ICSR 3	8
Es harmattan	27	IS 2331	9
Esatena	28	IS 39005	10
Kalature	29	ICSR 116	11
Albany	30	IS 39542	12
Artica	31	unl Simon	13
Esatiza	32	Roma	14
Arkania	33	Blue Ribbon	15
ICSR 14001	34	unl Hybrid3	16
S135	35	unl Sugercane	17
ICSV741	36	Smith	18

چگونگی اعمال تنش خشکی

اعمال تنش در زمان آغاز خوشه‌دهی انجام گرفت و تا این زمان آبیاری به‌طور یکسان برای همه تیمارها انجام شد. برای تعیین زمان آبیاری در هنگام تنش پس از هر آبیاری مقدار تجمعی تبخیر و تعرق پتانسیل یا مرجع (ET_0) با استفاده از داده‌های روزانه هواشناسی و رابطه فائو-پنمن-مانتیث محاسبه شد (۴):

$$ET_i = ET_o \times K_c \quad (۱)$$

که در این رابطه، K_c ضریب گیاهی و ET_i تبخیر و تعرق روزانه هستند. زمانی که مقدار تبخیر و تعرق تجمعی به عمق مجاز تخلیه رطوبت از عمق توسعه ریشه[1] (RAW) در تیمار مورد نظر می‌رسید، آبیاری انجام می‌شد. چون تنش خشکی از مرحله زایشی به بعد اعمال شد مقدار K_c در مرحله رشد میانی (از شروع مرحله زایشی تا زمان شروع رسیدگی گیاه) برابر ۱/۱۲ و در مرحله پایانی برابر ۰/۹۸ در نظر گرفته شد. مقدار آب قابل دسترس از رابطه زیر محاسبه شد:

$$RAW=(FC-PWP)\times D\times MAD \quad (۲)$$

در معادله فوق، FC مقدار رطوبت وزنی خاک در حد گنجایش مزرعه، PWP مقدار رطوبت وزنی خاک در حد پژمردگی دائم،

4. Readily available water

D عمق توسعه ریشه (۶۰ cm)، و MAD ضریب مدیریت مزرعه که برای حالت تنش برابر ۰/۸۵ و برای حالت بدون تنش برابر ۰/۵۰ در نظر گرفته شد (۴).

برای اطمینان از تنش و بدون تنش در دو تیمار، پیش از آبیاری از اعماق ۲۰، ۴۰ و ۹۰ سانتی‌متری نمونه خاک تهیه شده و برای تعیین میزان رطوبت به آزمایشگاه منتقل شد. سپس مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در لایه توسعه ریشه با مقدار رطوبت مورد انتظار خاک در زمان آبیاری هر تیمار (θ_{irri}) مقایسه شد. برای تعیین میزان آب مورد نیاز هر کرت ابتدا عمق آبیاری با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$I=(FC-\theta_{irri})\times B\times D \quad (۳)$$

B چگالی ظاهری خاک، D عمق توسعه ریشه، و θ_{irri} میانگین رطوبت وزنی در عمق توسعه ریشه مربوط به زمان آبیاری که از فرمول زیر به‌دست آمد:

$$\theta_{irri}=FC-[(FC-PWP)\times MAD] \quad (۴)$$

سپس حجم آبیاری به شرح زیر محاسبه شد:

$$V=I\times A \quad (۵)$$

A مساحت کرت و I عمق آبیاری است. برای اندازه‌گیری میزان آب ورودی کرت‌ها از WSC فلوم تیپ شماره ۳ استفاده شد که دبی آب عبوری آن بر اساس قرائت شاخص ارتفاع آب از طریق فرمول زیر محاسبه شد:

$$Q=0.0037\times H^{2.63} \quad (۶)$$

Q برابر دبی آب ورودی (لیتر بر ثانیه) و H ارتفاع آب در وسط فلوم بر حسب سانتی‌متر است.

در پژوهش حاضر صفات مهم از جمله ارتفاع بوته، تعداد پنجه در بوته، قطر ساقه در انتهای فصل رشد و عملکرد علوفه تر پس از برداشت اندازه‌گیری شد. در هر واحد آزمایشی ۵ بوته به‌طور تصادفی و با رعایت اثر حاشیه انتخاب شد و صفات در آن‌ها اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور ارزیابی ژنوتیپ‌ها از لحاظ تحمل به خشکی، شاخص تحمل به تنش (۱۵)، شاخص تحمل (۳۲)، میانگین هندسی عملکرد (۱۴)، میانگین بهره‌وری (۳۲)، شاخص حساسیت تنش (۱۶)، شاخص عملکرد (۱۷)، شاخص پایداری عملکرد (۷) با فرمول‌های زیر محاسبه شده و استفاده شد:

$$STI=\left(YP\times YS\right)/\left(\overline{YP}\right)^2 \quad (۷)$$ (شاخص تحمل به تنش)

$$TOL=YP-YS \quad (۸)$$ (شاخص تحمل[۱])

$$GMP=\sqrt{YP\times YS} \quad (۹)$$ (میانگین هندسی عملکرد)

$$MP=(YP+YS)/2 \quad (۱۰)$$ (میانگین بهره‌وری)

$$SSI=\frac{1-YS/YP}{1-\overline{YS}/\overline{YP}} \quad (۱۱)$$ (شاخص حساسیت تنش[۲])

$$YI=\frac{YS}{\overline{YS}} \quad (۱۲)$$ (شاخص عملکرد[۳])

$$YSI=\frac{YS}{YP} \quad (۱۳)$$ (شاخص پایداری عملکرد[۴])

در معادلات فوق YP و YS به‌ترتیب عملکرد در شرایط بدون تنش و تنش کم‌آبی، $\overline{YP}$ و $\overline{YS}$ میانگین عملکرد در شرایط بدون تنش و تنش کم‌آبی هستند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها برای هر محیط رطوبتی به‌صورت جداگانه در قالب طرح لاتیس ساده انجام شد. مزیت نسبی طرح لاتیس نسبت به طرح بلوک‌های کامل تصادفی نشان داد که تجزیه واریانس به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی امکان‌پذیر است. بنابراین تجزیه واریانس مرکب در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با نرم‌افزار SAS انجام شد. تجزیه مؤلفه‌های اصلی و رسم بای‌پلات با استفاده از نرم‌افزار XlSTAT انجام شد. برای تجزیه مسیر نیز از نرم‌افزار Path Analysis استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که ارقام مختلف سورگوم علوفه‌ای از لحاظ صفات ارتفاع بوته، قطر ساقه و عملکرد علوفه تر تفاوت بسیار معنی‌داری داشتند (جدول ۲)، که بیانگر

5. Tolerance index
6. Stress susceptibility index
7. Yield index
8. Yield stability index

جدول ۲. تجزیه واریانس مرکب صفات مهم ارقام سورگوم علوفه‌ای تحت شرایط بدون تنش و تنش کم‌آبی و درصد کاهش صفات در اثر تنش کم‌آبی.

Table 2. Combined analysis of variance of important traits in forage sorghum cultivars under non-stress and water deficit conditions and reduction percentage of traits due to water deficit.

	میانگین مجموع مربعات Mean sum of squares				
عملکرد علوفه تر Fresh forage yield	تعداد پنجه Tiller number	قطر ساقه Stem diameter	ارتفاع بوته Plant height	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Source of variations
1042.88*	1.38ns	0.63ns	35218.77**	1	محیط Environment (E)
21.19	1.63	0.31	756.10	2	تکرار (محیط) Replication (E)
120.16**	1.40 ns	0.84**	9461.42**	35	ژنوتیپ Genotype (G)
20.58 ns	ns 0.36	0.19ns	997.27**	35	ژنوتیپ × محیط G × E
16.63	1.05	0.12	496.66	70	خطا Error
25.66	28.62	17.27	13.75		ضریب تغییرات CV
44.80*	16.13	5.61	18.28*		درصد کاهش صفات در اثر تنش کم‌آبی Reduction percentage of traits due to water deficit

ns ، * و **: به‌ترتیب بیانگر اثر غیرمعنی‌دار و اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns , * and ** indicate non-significant effect, significant effect at probability levels of 5 and 1%, respectively.

تنوع کافی ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی از لحاظ صفات مذکور است. به‌طور کلی رقم unl Hybrid3 بیشترین عملکرد علوفه تر (۲۶/۶۲ کیلوگرم در مترمربع) و قطر ساقه (۲/۹۸ سانتی‌متر) را با اختلاف معنی‌دار از سایر ارقام به خود اختصاص داد. این رقم از لحاظ صفت ارتفاع نیز در بالاترین گروه با میانگین ۲۳۲/۷۵ سانتی‌متر قرار گرفت (نتایج نشان داده نشده است). مقایسه میانگین نشان داد ارقام unl Hybrid3، Speed Feed، ICSV 25264، Dale، Wray، Smith و M 816 بیش‌ترین عملکرد علوفه تر در محیط بدون تنش و ارقام unl Hybrid3، Wray، Speed Feed و Smith بیش‌ترین عملکرد علوفه تر در محیط تنش کم‌آبی را دارا بودند (جدول ۳). نتایج نشان داد اثر برهم‌کنش رقم و محیط تنها در صفت ارتفاع بوته بسیار معنی‌دار بود که نشان‌دهنده واکنش متفاوت ارقام در دو محیط تنش رطوبتی در این صفت است (جدول ۲).

اثر محیط (تنش کم‌آبی) بر صفات عملکرد علوفه تر و ارتفاع بوته معنی‌دار بود. تنش کم‌آبی در مرحله رشد زایشی باعث کاهش ۴۴/۸ درصد عملکرد علوفه تر شد (جدول ۲). میانگین عملکرد علوفه تر در شرایط بدون تنش و تنش کم‌آبی به‌ترتیب برابر ۱۲/۰۳ و ۶/۶۵ کیلوگرم در مترمربع بود. گزارش‌های متعددی مبنی بر کاهش عملکرد علوفه در سورگوم ناشی از تنش کم‌آبی وجود دارد (۱، ۲، ۵ و ۱۸). تنش کم‌آبی عملکرد سورگوم را از طریق کاهش جذب تشعشعات فعال فتوسنتزی توسط کانوپی، کاهش کارآیی مصرف تشعشع و کاهش شاخص برداشت تحت تأثیر قرار می‌دهد (۲۱). زمان اعمال تنش بر نوع و میزان خسارت وارده آثار زیادی دارد (۱۸). در پژوهشی کاهش عملکرد علوفه سورگوم در تنش شدید ۴۷ درصد گزارش شد (۲). پژوهش‌های انجام شده روی سورگوم نشان داد که تنش در مرحله رشد زایشی تا ۵۰ درصد عملکرد دانه را

جدول ۳. مقایسه میانگین ارقام مختلف سورگوم علوفه‌ای برای شاخص‌های تحمل به تنش و صفت عملکرد در دو شرایط رطوبتی.

Table 3. Mean comparisons of different forage sorghum cultivars for stress tolerance indices and yield trait in two moisture conditions.

Ys (kg m^{-2})	Yn (kg m^{-2})	YI	SSI	STI	MP	GMP	Tol	YSI	ژنوتیپ Genotype
12.15	26.70	1.8771	1.1601	2.1770	19.4250	18.0112	14.5500	0.4551	IS 39431
5.33	12.83	0.8227	1.2449	0.4583	9.0750	8.2640	7.5000	0.4152	ICSV 25264
7.05	13.80	1.0892	1.0413	0.6529	10.4250	9.8636	6.7500	0.5109	IS 23574
2.48	4.28	0.3824	0.8963	0.0710	3.3750	3.2528	1.8000	0.5789	ICSB 2
3.00	6.23	0.4635	1.1029	0.1253	4.6125	4.3215	3.2250	0.4819	ICSR 137
4.88	8.40	0.7531	0.8933	0.2748	6.6375	6.3992	3.5250	0.5804	ICSR 82
6.90	6.83	1.0660	-0.0234	0.3160	6.8625	6.8624	-0.0750	1.0110	ICSR 59
3.30	9.30	0.5098	1.3734	0.2059	6.3000	5.5399	6.0000	0.3548	ICSR 3
8.70	9.53	1.3441	0.1844	0.5561	9.1125	9.1032	0.8250	0.9134	IS 2331
10.95	11.40	1.6917	0.0840	0.8377	11.1750	11.1727	0.4500	0.9605	IS 39005
6.98	13.31	1.0776	1.0134	0.6231	10.1438	9.6361	6.3375	0.5239	ICSR 116
4.20	16.43	0.6489	1.5844	0.4629	10.3125	8.3057	12.2250	0.2557	IS 39542
6.00	6.45	0.9269	0.1485	0.2597	6.2250	6.2209	0.4500	0.9302	unl Simon
4.35	9.60	0.6720	1.1642	0.2802	6.9750	6.4622	5.2500	0.4531	Roma
6.08	9.45	0.9385	0.7603	0.3852	7.7625	7.5769	3.3750	0.6429	Blue Ribbon
21.08	32.18	3.2559	0.7344	4.5504	26.6250	26.0401	11.1000	0.6550	unl Hybrid3
7.50	14.10	1.1587	0.9965	0.7096	10.8000	10.2835	6.6000	0.5319	unl Sugercane
12.23	20.33	1.8886	0.8484	1.6674	16.2750	15.7630	8.1000	0.6015	Smith
2.25	10.09	0.3476	1.6540	0.1523	6.1688	4.7641	7.8375	0.2230	Memoniate
4.20	8.03	0.6489	1.0147	0.2262	6.1125	5.8056	3.8250	0.5234	N98
16.28	21.15	2.5143	0.4907	2.3099	18.7125	18.5531	4.8750	0.7695	Wray
11.33	23.48	1.7496	1.1018	1.7840	17.4000	16.3050	12.1500	0.4824	Dale
7.28	9.53	1.1239	0.5029	0.4650	8.4000	8.3243	2.2500	0.7638	Keller
8.59	19.13	1.3267	1.1729	1.1021	13.8563	12.8155	10.5375	0.4490	M 816
12.83	27.00	1.9813	1.1176	2.3237	19.9125	18.6085	14.1750	0.4750	Speed Feed
3.79	3.26	0.5851	-0.3426	0.0829	3.5250	3.5152	-0.5250	1.1609	EU G.542F
3.15	11.78	0.4866	1.5593	0.2489	7.4625	6.0903	8.6250	0.2675	Es harmattan
5.55	11.33	0.8574	1.0855	0.4218	8.4375	7.9280	5.7750	0.4901	Esatena
2.63	5.78	0.4055	1.1612	0.1017	4.2000	3.8935	3.1500	0.4545	Kalature
3.53	4.20	0.5446	0.3421	0.0994	3.8625	3.8477	0.6750	0.8393	Albany
2.10	3.98	0.3244	1.0041	0.0560	3.0375	2.8892	1.8750	0.5283	Artica
1.95	5.66	0.3013	1.3957	0.0741	3.8063	3.3229	3.7125	0.3444	Esatiza
2.25	8.70	0.3476	1.5782	0.1314	5.4750	4.4244	6.4500	0.2586	Arkania
2.55	12.30	0.3939	1.6875	0.2105	7.4250	5.6004	9.7500	0.2073	ICSR 14001
3.38	10.35	0.5214	1.4346	0.2344	6.8625	5.9103	6.9750	0.3261	S135
6.30	12.64	0.9733	1.0676	0.5343	9.4688	8.9228	6.3375	0.4985	ICSV741
8.89	14.25	1.3737	1.0126	1.8812	11.134	10.869	8.2661	0.4756	LSD (5%)

شاخص تحمل به تنش: STI، شاخص تحمل: TOL، میانگین هندسی عملکرد: GMP، میانگین بهره‌وری: MP، شاخص حساسیت تنش: SSI، شاخص عملکرد: YI، شاخص پایداری عملکرد: YSI، Yn: عملکرد علوفه در شرایط بدون تنش و Ys: عملکرد علوفه در شرایط تنش کم‌آبی.

Stress tolerance index: STI, Tolerance index: TOL, Geometric mean productivity: GMP, Mean productivity: MP, Stress susceptibility index: SSI, Yield index: YI, Yield stability index: YSI, Yn: Forage yield under non stress, Ys: Forage yield under water deficit.

کاهش می‌دهد اما بروز تنش در مرحله رویشی در سورگوم ۳۰ درصد عملکرد خشک را کاهش می‌دهد (۵).

نتایج این پژوهش نشان داد ارتفاع بوته کاهش معنی‌داری در اثر تنش کم‌آبی در مرحله زایشی نشان داد (۱۸/۳ درصد). این نتایج بیانگر این است که ارتفاع بوته در سورگوم علوفه‌ای با وارد شدن به مرحله زایشی متوقف نمی‌شود یا به عبارتی ارتفاع بوته در سورگوم در مرحله زایشی به حداکثر خود نمی‌رسد. بنابراین اعمال تنش در این مرحله باعث کاهش

ارتفاع گیاه می‌شود. گزارش‌های متعدد حاکی از آن است که وارد شدن سورگوم علوفه‌ای از مرحله رشد رویشی به رشد زایشی موجب توقف تولید برگ‌ها می‌شود درحالی که رشد ساقه همچنان ادامه دارد (۶ و ۸). تنش کم‌آبی پیش از و در زمان گل‌دهی در ژنوتیپ‌های حساس سورگوم منجر به تأخیر در گل‌دهی و کاهش ارتفاع گیاه می‌شود (۵). گزارش‌های متعدد مبنی بر کاهش ارتفاع گیاه سورگوم ناشی از تنش کم‌آبی وجود دارد (۱۱، ۲۰، ۲۲ و ۲۶). افزایش تنش به‌علت تغییر در تعادل هورمونی درون گیاه باعث کاهش طول میان‌گره شده که نتیجه آن کاهش ارتفاع بوته در ژنوتیپ‌ها است. علاوه بر این مواد غذایی که گیاه از خاک جذب می‌کند به‌صورت محلول در آب هستند، که محدودیت در منابع آبی منجر به محدودیت در کلیه منابع غذایی شده و گیاه مجبور به کاهش رشد و کاهش طول اندام‌های مختلف از جمله ارتفاع بوته می‌شود (۳۵).

نتایج مربوط به صفات تعداد پنجه در بوته و قطر ساقه نشان داد که تنش کم‌آبی در مرحله رشد زایشی بر این صفات اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۲). از آنجایی که پنجه‌زنی در سورگوم پیش از مرحله خوشه‌دهی است. بنابراین تنش کم‌آبی در مرحله خوشه‌دهی بر تعداد پنجه در بوته تأثیری نداشت. همچنین نتایج نشان داد تنش کم‌آبی در مرحله زایشی بیش‌تر باعث کاهش رشد و تقسیم سلولی در امتداد طولی نسبت به امتداد عرضی شده است و در نتیجه تنش کم‌آبی در این مرحله از رشد کاهش معنی‌دار ارتفاع را به‌دنبال داشت و بر قطر ساقه تأثیر معنی‌داری نداشت. بین ارقام مختلف از نظر قطر ساقه اختلاف بسیار معنی‌داری مشاهده شد و رقم unl Hybrid 3 بیش‌ترین قطر ساقه را به خود اختصاص داد. سرشاد و همکاران (۳۳) نیز گزارش کردند که بین سطوح مختلف آبیاری بر اساس تعداد پنجه در بوته در مراحل مختلف اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.

شاخص‌های حساسیت و تحمل به تنش خشکی

در این پژوهش انواع شاخص‌های حساسیت و تحمل به تنش خشکی برای ژنوتیپ‌های مختلف محاسبه شد و همبستگی بین شاخص‌ها و عملکرد در هر دو شرایط رطوبتی محاسبه شد. شاخص‌هایی که همبستگی زیاد در هر دو شرایط نشان دادند به‌عنوان بهترین شاخص شناخته شدند، زیرا این شاخص‌ها قادر به تفکیک و شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد زیاد در هر دو محیط هستند (۱۲). نتایج همبستگی بین شاخص‌های تحمل مورد بررسی و عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش رطوبتی در جدول (۴) آورده شده است. بررسی همبستگی بین عملکرد علوفه و شاخص‌های تحمل به تنش نشان داد شاخص‌های MP، YI، STI و GMP همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد علوفه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش رطوبتی داشتند. این همبستگی زیاد نشان‌دهنده توانایی شاخص‌های MP، YI، STI و GMP در انتخاب ارقام متحمل به تنش کم‌آبی و دارای پتانسیل عملکرد زیاد در هر دو محیط تنش و بدون تنش رطوبتی است. لذا می‌توان این شاخص‌ها را به‌عنوان بهترین شاخص‌های ارزیابی تحمل به تنش برای انتخاب ارقام متحمل و دارای عملکرد زیاد در هر دو شرایط رطوبتی معرفی کرد. مقایسه میانگین بر اساس شاخص‌های MP، YI، STI و GMP نشان داد ارقام unl Hybrid3، Speed Feed، Wray، Smith، ICSV 25264 و Dale به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل شناخته شدند. ارقام مذکور علاوه بر اینکه از لحاظ این شاخص‌ها دارای بیشترین مقدار و در نتیجه متحمل‌ترین در برابر تنش خشکی بودند در مقایسه میانگین صفت عملکرد نیز از عملکرد زیادی در هر دو شرایط رطوبتی نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برخوردار بودند (جدول ۳). شاخص TOL همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار با عملکرد علوفه در شرایط بدون تنش رطوبتی در این پژوهش نشان داد (جدول ۴). یعنی ژنوتیپ‌هایی که شاخص TOL کوچک‌تر داشته و بر اساس این شاخص متحمل به تنش شناخته شدند عملکرد آن‌ها در شرایط بدون تنش کم بود. بنابراین این شاخص توانایی لازم برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل و با عملکرد زیاد در هر دو شرایط رطوبتی را ندارد. برای مثال ارقام EU G/542F، ICSR 59 و unl Simon

جدول ۴. ضرایب همبستگی بین شاخص‌های تحمل به تنش و عملکرد ارقام مختلف سورگوم علوفه‌ای در دو شرایط رطوبتی.

Table 4. Correlation coefficients between stress tolerance indices and yield of different forage sorghum cultivars in two moisture conditions.

YI	SSI	STI	MP	GMP	Tol	YSI	Yn	Ys	
								0.84 **	Yn
							-0.18	0.32	YSI
						-0.65	0.82 **	0.38	Tol
					0.60	0.09	0.95 **	0.97 **	GMP
				0.99 **	0.67 *	0.02	0.98 **	0.94 **	MP
			0.96 **	0.96 **	0.55	0.09	0.91 **	0.94 **	STI
		0.09	0.02	0.09	0.65 *	1.00	0.18	0.32	SSI
	0.32	0.94 **	0.94 **	0.97 **	0.37	0.32	0.84 **	1.00 **	YI

* و **: به‌ترتیب بیانگر معنی‌داری همبستگی در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

* and ** indicate significant correlation at probability levels of 5 and 1%, respectively.

شاخص تحمل به تنش: STI، شاخص تحمل: TOL، میانگین هندسی عملکرد: GMP، میانگین بهره‌وری: MP، شاخص حساسیت تنش: SSI، شاخص عملکرد: YI، شاخص پایداری عملکرد: YSI، Yn: عملکرد علوفه در شرایط بدون تنش و Ys: عملکرد علوفه در شرایط تنش کم‌آبی.

Stress tolerance index: STI, Tolerance index: TOL, Geometric mean productivity: GMP, Mean productivity: MP, Stress susceptibility index: SSI, Yield index: YI, Yield stability index: YSI, Yn: Forage yield under non stress, Ys: Forage yield under water deficit.

که از لحاظ شاخص TOL بسیار پایین و در نتیجه متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها از لحاظ این شاخص بودند اما از لحاظ عملکرد علوفه در هر دو شرایط رطوبتی در پایین‌ترین گروه قرار گرفتند و نسبت به میانگین عملکرد در هر دو شرایط رطوبتی عملکرد کم‌تری داشتند (جدول ۳). خزائی (۲۱) در ارزیابی تحمل تنش خشکی در لاین‌های امیدبخش سورگوم علوفه‌ای، شاخص‌های تحمل تنش (STI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) و میانگین تولید (MP) را با همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد علوفه در شرایط تنش و بدون تنش، به‌عنوان معیارهای مناسب برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کم‌آبی معرفی کرد. فرناندز (۱۵) گزارش کرد شاخص‌های GMP و STI همبستگی قویی با عملکرد در شرایط تنش و نرمال رطوبتی دارند، و از این‌رو این شاخص‌ها ابزار مناسبی برای انتخاب ارقام متحمل و دارای عملکرد زیاد هستند. ابراهیمی و همکاران (۹) و عبدالشاهی و همکاران (۳) شاخص‌های MP، GMP و STI را به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها برای شناسائی تحمل به تنش کم‌آبی به‌ترتیب در گلرنگ و گندم معرفی کردند.

برای ارزیابی دقیق‌تر روابط بین شاخص‌ها و عملکرد در هر دو شرایط رطوبتی و مطالعه همزمان آن‌ها، تجزیه مؤلفه اصلی شاخص‌ها و عملکرد انجام شد. تجزیه به مؤلفه‌ها نشان داد که دو مؤلفه اول در مجموع ۹۷/۸۲ درصد تغییرات را توجیه کردند که سهم مؤلفه اول ۶۷/۷۰ درصد و سهم مؤلفه دوم ۳۰/۱۲ درصد است. با توجه به اینکه مقادیر کم شاخص‌های TOL و SSI و همچنین مقادیر زیاد سایر شاخص‌ها نشان‌دهنده تحمل به تنش کم‌آبی است و با توجه به ضرایب این شاخص‌ها و عملکرد در هر دو شرایط رطوبتی، مؤلفه اول به‌عنوان مؤلفه پتانسیل عملکرد و تحمل به تنش (ارقامی که PC1 زیادی دارند متحمل هستند) شناخته شد. همچنین با توجه به اینکه مؤلفه دوم تحت تأثیر TOL و SSI با ضرایب مثبت و GMP، STI و YSI با ضرایب منفی قرار داشت (جدول ۵) به‌عنوان مؤلفه حساسیت به تنش (ارقامی که PC2 زیادی دارند حساس هستند) شناخته شد. بنابراین، ژنوتیپ‌هایی که PC1 زیاد و PC2 کمی داشته باشند متحمل به تنش کم‌آبی هستند. با توجه به نتایج حاصله ارقام unl Hybrid3، Wray، Speed Feed، ICSV 25264T، Dale و Smith به‌عنوان

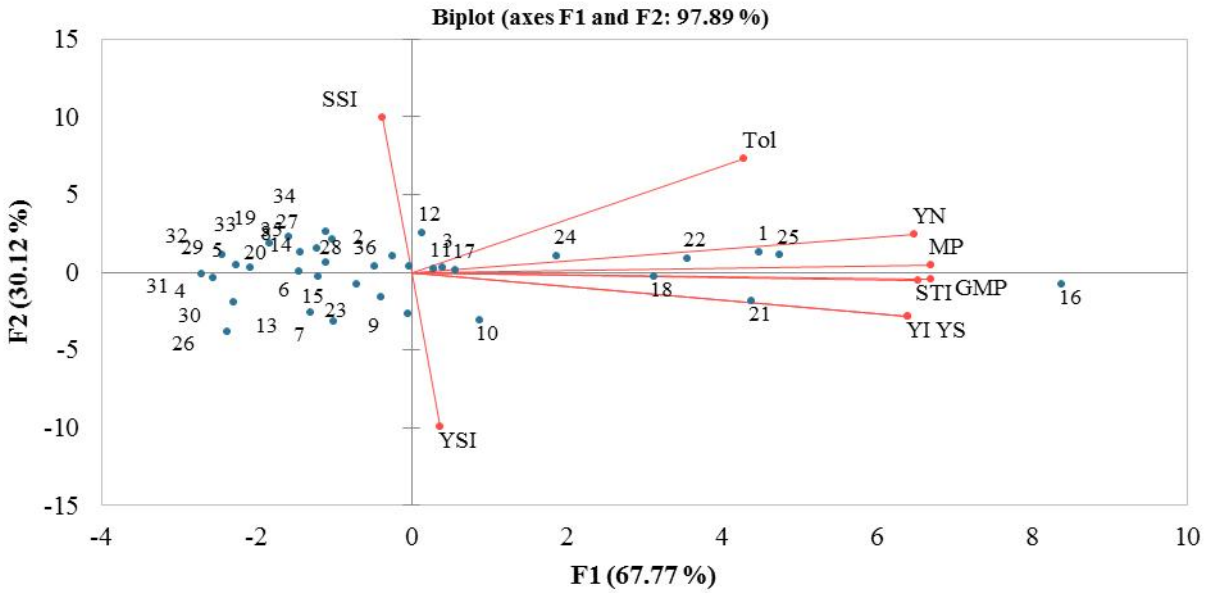
جدول ۵. ضرایب مؤلفه‌های اول و دوم (PC1 و PC2) در تجزیه به مؤلفه اصلی برای شاخص‌های تحمل به تنش در ارقام مختلف سورگوم علوفه‌ای.

Table 5. Coefficients of the first and second components (PC1 and PC2) in principal component analysis for stress tolerance indices in different forage sorghum cultivars.

مؤلفه دوم	مؤلفه اول	شاخص‌ها
PC2	PC1	Indices
0.4408	0.2585	Tol
-0.026	0.404	GMP
0.0259	0.4041	MP
-0.031	0.3938	STI
0.6008	-0.022	SSI
-0.172	0.3859	YI
-0.601	0.0223	YSI
0.1481	0.3908	Yn
-0.172	0.3859	Ys

شاخص تحمل به تنش: STI، شاخص تحمل: TOL، میانگین هندسی عملکرد: GMP، میانگین بهره‌وری: MP، شاخص حساسیت تنش: SSI، شاخص عملکرد: YI، شاخص پایداری عملکرد: YSI، Yn: عملکرد علوفه در شرایط بدون تنش و Ys: عملکرد علوفه در شرایط تنش کم‌آبی.

Stress tolerance index: STI, Tolerance index: TOL, Geometric mean productivity: GMP, Mean productivity: MP, Stress susceptibility index: SSI, Yield index: YI, Yield stability index: YSI, Yn: Forage yield under non stress, Ys: Forage yield under water deficit.



شکل ۱. نمودار بای‌پلات بر اساس مؤلفه‌های اول و دوم (PC1 و PC2) برای شاخص‌های تحمل به تنش در ارقام مختلف سورگوم علوفه‌ای.

Figure 1. Biplot diagram based on the first and second components (PC1 and PC2) for stress tolerance indices in different forage sorghum cultivars.

ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کم‌آبی و ارقام ICSR 14001، Memoniate و Arkania به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس به تنش کم‌آبی معرفی شدند (شکل ۱). خزائی (۲۱) نیز در بررسی روابط بین ۵ لاین سورگوم علوفه‌ای و شاخص‌ها به‌صورت بای‌پلات، مؤلفه اول را با نام مؤلفه پتانسیل و تحمل به خشکی معرفی کرد و مؤلفه دوم را مؤلفه حساسیت به تنش خشکی نام‌گذاری کرد.

تجزیه مسیر

باتوجه به اهمیت تعیین ارتباط بین صفات مهم با عملکرد علوفه، تجزیه مسیر امکان شناسایی آثار مستقیم و غیرمستقیم

جدول ۶. ضرایب تجزیه مسیر عملکرد علوفه و صفات مهم در سورگوم علوفه‌ای تحت شرایط بدون تنش کم‌آبی.

Table 6. Path analysis coefficients of forage yield and important traits in forage sorghum under non-stress condition.

صفت Trait	اثر مستقیم Direct effect	اثر غیرمستقیم Indirect effect			اثر کل Total effect
		ارتفاع Plant height	قطر ساقه Stem diameter	تعدادپنجه Tiller number	
ارتفاع Plant height	0.54		0.18	-0.04	0.66
قطر ساقه Stem diameter	0.37	0.14		-0.04	0.53
تعداد پنجه Tiller number	0.35	-0.03	-0.04		0.27
اثر باقی‌مانده Residual effect	0.60				

صفات مؤثر بر عملکرد را فراهم می‌کند. تجزیه مسیر با در نظر گرفتن عملکرد علوفه به‌عنوان متغیر وابسته و سایر صفات به‌عنوان متغیرهای مستقل در هر دو محیط بدون تنش و تنش خشکی در مرحله زایشی انجام شد (جداول ۶ و ۷). ارتفاع بوته بیش‌ترین اثر مستقیم (۰/۵۴) را بر عملکرد علوفه در شرایط بدون تنش داشت؛ این صفت اثر غیرمستقیم ۰/۱۸ از طریق قطر ساقه و اثر منفی ناچیز ۰/۰۴- از طریق تعداد پنجه بر عملکرد علوفه سورگوم داشت (جدول ۶). رفیعی (۲۹) گزارش کرد که عملکرد و برتری سورگوم علوفه‌ای تابعی از ارتفاع گیاه است. به این معنا که هر چه ارتفاع گیاه در هنگام برداشت بیش‌تر باشد عملکرد علوفه بیش‌تر خواهد بود. در بین صفات مورد بررسی، قطر ساقه پس از ارتفاع بیش‌ترین اثر مستقیم (۰/۳۷) را بر عملکرد علوفه در شرایط بدون تنش نشان داد. قطر ساقه اثر غیرمستقیم خود را با اثر مثبت از طریق ارتفاع بوته (۰/۱۴) و اثر منفی ناچیز (۰/۰۴-) از طریق تعداد پنجه بر عملکرد علوفه در شرایط بدون تنش گذاشت. در نهایت صفت تعداد پنجه با مقدار ۰/۳۵ اثر مستقیم بر عملکرد علوفه در شرایط بدون تنش داشت. این صفت اثر غیرمستقیم منفی بر عملکرد علوفه از طریق صفات ارتفاع و قطر ساقه به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۳- و ۰/۰۴- تحت شرایط بدون تنش داشت (جدول ۶).

نتایج تجزیه مسیر تحت شرایط تنش کم‌آبی نشان داد صفت قطر ساقه بیش‌ترین اثر مستقیم را بر عملکرد علوفه تر در شرایط تنش داشت (۰/۶۴) و این صفت از طریق ارتفاع بوته اثر غیرمستقیم مثبتی (۰/۲۷) را بر عملکرد علوفه تحت شرایط تنش نشان داد. همچنین قطر ساقه اثر غیرمستقیم منفی (۰/۰۵-) بر عملکرد علوفه تر از طریق صفت تعداد پنجه در شرایط تنش داشت. صفت تعداد پنجه در شرایط تنش پس از قطر ساقه بیش‌ترین اثر مستقیم (۰/۳۴) را بر عملکرد علوفه تر سورگوم نشان داد. اثر غیرمستقیم صفت تعداد پنجه بر عملکرد علوفه تر تحت شرایط تنش از طریق صفت ارتفاع بوته مثبت (۰/۰۷) و از طریق قطر ساقه منفی (۰/۰۳-) بود (جدول ۷). ملکی و همکاران (۲۴) نیز گزارش کردند برای تولید مقدار مناسب علوفه، مدیریت باید به‌گونه‌ای باشد که صفات وزن خشک برگ، تعداد پنجه در بوته و قطر ساقه در سطح مناسبی حفظ شوند. گزارش‌های متعدد مبنی بر اینکه در سورگوم علوفه‌ای تحت شرایط تنش ارقامی که تعداد پنجه بیش‌تری دارند اکثراً علوفه بیش‌تری تولید می‌کنند (۲۳ و ۲۵). ارتفاع بوته در شرایط تنش کم‌آبی بر خلاف شرایط بدون تنش کم‌ترین اثر مستقیم (۰/۱۹) را بر عملکرد علوفه داشت و این صفت اثر غیرمستقیم مثبت بر عملکرد علوفه را از طریق صفات قطر ساقه و تعداد پنجه با مقادیر ۰/۰۸ و ۰/۰۴ تحت شرایط تنش داشت (جدول ۷).

جدول ۷. ضرایب تجزیه مسیر عملکرد علوفه با برخی صفات مهم در سورگوم تحت شرایط تنش کم‌آبی.

Table 7. Path analysis coefficient of forage yield and important traits in forage sorghum under water deficit condition.

صفت Trait	اثر مستقیم Direct effect	اثر غیرمستقیم Indirect effect		اثر کل Total effect
		ارتفاع Plant height	قطر ساقه Stem diameter	
ارتفاع Plant height	0.19		0.08	0.53
قطر ساقه Stem diameter	0.64	0.27		0.69
تعداد پنجه Tiller number	0.34	0.07	-0.03	0.33
اثر باقی‌مانده Residual effect	0.58			

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی تنش کم‌آبی در مرحله آغاز خوشه‌دهی (مرحله زایشی) اثر معنی‌داری بر کاهش عملکرد علوفه تر (۴۵ درصد) و ارتفاع بوته گیاه (۱۸ درصد) در سورگوم علوفه‌ای داشت. محدودیت در منابع آبی منجر به محدودیت در جذب مواد غذایی محلول در آب توسط گیاه شده و در نتیجه گیاه مجبور به کاهش رشد و کاهش طول اندام‌های مختلف از جمله ارتفاع بوته و عملکرد می‌شود. نتایج نشان داد که تنوع کافی در ژرم پلاسم مورد بررسی از لحاظ عملکرد علوفه تر، ارتفاع، قطر ساقه و پاسخ به تنش در شرایط کم‌آبی وجود داشته و امکان گزینش ارقام متحمل به تنش کم‌آبی برای دستیابی به عملکرد زیاد و مناسب کشت در مناطق دارای محدودیت منابع کم‌آبی وجود دارد. بر اساس نتایج حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی برای شاخص‌های مختلف حساسیت و تحمل به تنش، ارقام Hybrid 3 ،unl ،Speed Feed ،Wray ،Smith ،ICSV 25264 و Dale به‌عنوان متحمل‌ترین ارقام شناخته شدند که از پتانسیل عملکرد زیاد در هر دو شرایط رطوبتی نیز برخوردار بودند. بر اساس نتایج تجزیه مسیر، ارتفاع بوته و قطر ساقه به‌ترتیب در شرایط بدون تنش و تنش کم‌آبی بیش‌ترین اثر مستقیم را بر عملکرد علوفه تر داشتند. ارتفاع بوته در شرایط تنش کم‌آبی بر خلاف شرایط بدون تنش اثر مستقیم ناچیزی بر عملکرد علوفه تر داشت. این نتایج بیانگر ضرورت بررسی روابط صفات به‌طور مجزا در هر کدام از شرایط رطوبتی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید باهنر کرمان و ریاست محترم پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی دانشگاه شهید باهنر کرمان به خاطر حمایت مالی و معنوی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Abreha, K.B., Enyew, M., Carlsson, A.S., Vetukuri, R.R., Feyissa, T., Motlhaodi, T., Ng'uni, D., Geleta, M., 2022. Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta* 20: 255–275.
2. Abdi, M., Habibi, M., 2017. Effect of drought stress on quantitative and qualitative traits of two forage sorghum cultivars in Jiroft region. *Agroecology Journal* 13(3): 35–40. (in Persian with English abstract)
3. Abdolshahi, R., Safarian, A., Nazari., M., Pourseyedi, S., Mohamadi-Nejad, Gh., 2012. Screening drought-tolerant

genotypes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) using different multivariate methods. *Archives of Agronomy and Soil Science* 59: 685–704.
4. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. *FAO Irrigation* and *Drainage Paper* 56. (FAO: Rome)
5. Ali, M.A., Abbas, A., Niaz, S., Zulkiffal, M., Ali, S., 2009. Morphophysiological criteria for drought tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor*) at seedling and post-anthesis Stages. *International Journal of Agricultural Biotechnology* 11: 674–680.
6. Birch, C.J., Ash, J.D., 1989. The response of forage sorghum to nitrogen fertilizer applied at planting and after cutting. Australian Sorghum Workshop, Toowomba
7. Bouslama, M., Schapaugh, W.T., 1984. Stress tolerance in soybean. Part 1: Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science* 24: 933–937.
8. Doggett, H., 1988. Sorghum. New York: Longman Scientific and Tech.
9. Ebrahimi, F., Majidi, M.M., Arzani, A., Mohammadi-Nejad, Gh., Dehghan Kouhestani, R., 2017. Yield potential and drought tolerance of some domestic and foreign varieties of safflower in three regions of Iran. *Journal of Crop Production and Processing* 7(3): 1–18. (in Persian with English abstract)
10. Emaam, Y., 2004. Cereal Agronomy. Shiraz University Publications. (in Persian)
11. Eshraghi-Nejad, M., Alavi-Siney, S.M., Aien, A., Mashayekhi Akbarabad, H., 2021. Introducion of the most suitable forage sorghum cultivar in the southern Kerman region. *Promotion Journal of Forage and Animal Food* 2(2): 105–110. (in Persian)
12. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 185–212.
13. Farshadfar, E., Amiri, R., 2018. Evaluation of drought resistance of different bread wheat lines using agrophysiological traits and integrated selection index. *Journal of Environmental Stress in Agricultural Sciences* 11: 79–91. (in Persian with English abstract)
14. Ferasat, M., Sajedi, N., Mirzakhani, M., 2012. Effects of drought stress on yield and yield components in safflower (*Carthamus tinctorius*) genotypes. *Iranian Journal of Field Crops Research* 10: 346–353. (in Persian)
15. Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In*:* Kuo, C.C. (Ed.), Proceedings of International Symposium on Adaptation of Food Crops to Temperature and Water Stress. Shanhua,Taiwan, pp. 257–270.
16. Fisher, R.A., Maurer, R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars, I: Grain yield responses. *Australian Journal of Crop Science* 29: 897–912.
17. Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campanile, R.G., Ricciardi, G.L., Borghi, B., 1997. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of Plant Science* 77: 523–531.
18. Habibi, M., Abdi, M., Mehrpoian, M., 2013. Study of quality characteristics of two forage sorghum cultivars speed feed and pegah under water deficit conditions. In: 2nd National Conference on New Concepts in Agriculture, December 19. (in Persian)
19. Jaleel, C.A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H.J., Somasundaram, R., Panneerselvam, R., 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition*. International Journal of Agriculture and Biology* 11: 100–105.
20. Khaton, M.A., Sagar, A., Tajkia, J.E., Islam, M.S., Mahmud, M.S., Hossain, A.K.M.Z., 2016. Effect of moisture stress on morphological and yield attributes of four sorghum varieties. *Progressive Agriculture* 27(3): 265–271.
21. Khazaei, A., 2017. Evaluation of drought tolerance in forage sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) promising lines. *Iranian Journal of Crop Sciences* 19(1): 73–85. (in Persian)
22. Khazaei, A., Sabouri, A., Shobar, Z., Shahbazi, M., 2016. Evaluation of grain yield of cultivars and promising lines of grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) using drought tolerance indices. *Seed and Plant Production Journal* 32(2): 99–118. (in Persian)
23. Lodhi, G.P., Grewal, R.P.S., Pahuja, S.K., 1994. Forage sorghum hybrid. In: Proceedings of annual all Indian group meeting, all India sorghum coordinator project, G. B. Pant University of Agriculture and Technology, Pantnagar, 8–10 April.
24. Maleki, A., Mirzaei Heidari, M., Fathi, A., 2017. Using multivariate statistical analysis of some agronomic traits on forage yield of sorghum under different levels of nitrogen and zinc. *Journal of Plant Ecophysiology* 9: 85–96. (in Persian with English abstract)
25. Mokhtarzadeh, A.A., 2003. Yield trial in new forage sorghum varieties at Isfahan condition. In: Proceedings of 8th Iranian Crop Sciences Congress, August 25–27, Gilan University, Rasht, Iran. pp. 1–6. (in Persian)
26. Nabati, J., Rezvani Moghaddam, P., 2010. The effect of irrigation intervals on yield and morphological characteristics of millet, sorghum and forage maize. *Iranian Journal of Crop Science* 41(1): 179–186. (in Persian)
27. Orfanou, A., Pavlou, D., Porter, W.M., 2019. Maize yield and irrigation applied in conservation and conventional

tillage at various plant densities. *Water* 11: 1–26.
28. Prasad, P.V.V., Pisipati, S.R., Mutava, R.N., Tuinstra, M.R., 2008. Sensitivity of grain sorghum to high temperature stress during reproductive development. *Crop Science* 48: 1911–1917.
29. Rafiee, M., 2018. Effect of sowing time on growth and yield of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.) cultivars in second cropping in temperate region of Lorestan province. *Iranian Journal of Crop Sciences* 20(3): 180–192. (in Persian with English abstract)
30. Rame, R., Kumari, S., 1995. Influence of variable amounts of irrigation water and nitrogen fertilizer on growth, yield and water use of grain sorghum. *Australian Journal of Crop Science* 47: 61–151.
31. Rathore, P.S., 2002. Techniques and management of field crop production. Updesh Purohit for Agrobios (India), Jodhpur, 524 p.
32. Rosielle, A.A., Hambline, J., 1981. Theoretical aspect of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Sci*ence 21: 943–946.
33. Sarshad, A., Talei, D., Torabi, M., Rafiei, F., Nejatkhah, P., 2020. Effect of irrigation cut at different stages of growth on yield, yield components and grain quality of different cultivars of sorghum seeds. *Scientific Journal of Crop Physiology* 12(45): 61–149. (in Persian with English abstract)
34. Sarvari, S.M., Beheshti, S.A., 2012. Relationship between grain yield and plant characteristics in grain sorghum genotypes in the normal and drought stress conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences* 14(2): 183–201. (in Persian with English abstract)
35. Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K.H.M., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R.K., HanumanthaRao, B., Nair, R.M., Prasad, P.V.V., Nayyar, H., 2018. Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science* 9: 1705
36. Yap, T.C., Harvey, B.L., 1972; Inheritance of yield components and morpho–physiological traits in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Crop Science* 12: 283–286
37. Zerbini, E., Thomas, D., 2003. Opportunities for improvement of nutritive value in sorghum and pearl millet residues in south Asia through genetic enhancement. *Field Crop Research* 84: 3–15.

Effect of Water Deficit at the Reproductive Stage on Different Forage Sorghum Cultivars

F. Ebrahimi[1*]

(Received: 3 March 2022; Accepted: 27 April 2022)

Abstract

Sorghum is of the most important forage plants with high production potential, the ability to grow in areas with poor soil, and high adaptation to stresses. To assess the effect of water deficit stress, the production potential and the relationship between important traits, 36 forage sorghum cultivars were studied under water deficit condition using a 6×6 Lattice design at the research farm of Shahid Bahonar University of Kerman in May, 2020. Water deficit was applied at the beginning of heading stage by irrigating at 85% depletion of soil available water. The non-stress conditions consisted of irrigation when 50% of the total available water was depleted from the root zone. The ANOVA showed that water deficit significantly reduced fresh forage yield and plant height by 44.80 and 18.28%, respectively. Cultivars unl Hybrid3, Wray, Speed Feed, and Smith had the highest fresh forage yields in both moisture conditions. Mean comparisons of MP, YI, GMP, and STI indices and principal component analysis for different indices showed that unl Hybrid3, Speed Feed, Wray, Smith, ICSV 25264, and Dale were as tolerant and high yielding cultivars in both moisture conditions. Based on the results of path analysis, plant height and stem diameter had the most direct effect on fresh forage yield under non-stress and water stress conditions, respectively. They had the most indirect effect on sorghum fresh forage yield through stem diameter and plant height, respectively. It may be concluded that water stress at the reproductive growth stage significantly reduced the growth and forage yield of sorghum. However, sufficient variation in the studied germplasm suggested the possibility of selection for more tolerant cultivars. The more tolerant cultivars with high yield potential in the studied germplasm may be proposed for cultivation in regions with limited water resources and traits identified effective on yield increase are suggested for breeding objectives.

Keywords: Fresh forage yield, Sorghum, Tolerance indices, Heading stage.

Background and objective: Water deficit is one of the most important factors limiting the survival and growth of plants in the arid and semi-arid regions of the world (3). Because of the deep root system, the ability to reduce transpiration through leaf rolling and stomatal closure, osmotic adjustment, and turgor pressure maintenance under water stress, sorghum can survive dry periods and resume growth once soil moisture becomes available and it is known for its drought tolerance among cereal crops. Despite its tolerance to drought, sorghum still suffers from yield losses of 50–90% due to drought, depending on severity (1). Identification of tolerant cultivars with high yield in this germplasm and the relationship

1- Research & Technology Institute of Plant Production, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
*: Corresponding author, Email: fa.ebrahimi@uk.ac.ir

between traits provide a useful gene pool and a good opportunity to improve sorghum in the arid and semiarid area.

Methods: In this study 36 cultivars were planted as 6×6 Lattice design in the research farm of the Shahid Bahonar University of Kerman under two conditions of non-stress and water deficit stress. In non-stress conditions, irrigation was applied when 50% of the total available water was depleted from the root zone. Under water deficit conditions, the plants were irrigated when 85 % of the total available water was depleted from the root zone (2). Water deficit was applied at the beginning of heading stage. Phenotypic traits including plant height, stem diameter, tiller number and fresh forage yield were measured.

Results: The results of the analysis of variance revealed high significant ($p < 0.01$) difference among the cultivars for important traits including plant height, stem diameter, and fresh forage yield. Also, the interaction between cultivar and environment was very significant only on plant height traits. Water deficit significantly reduced fresh forage yield and plant height by 44.8 and 18.3%, respectively. Comparison of means based on MP, YI, GMP, STI indices, and principal component analysis for different tolerance indices showed that cultivars unl Hybrid 3, Speed Feed, Wray, Smith, ICSV 25264, and Dale were as tolerant and high yielding cultivars in both non-stress and moisture stress conditions. Based on the results of path analysis, plant height and stem diameter had the most direct effect on fresh forage yield under non-stress and water deficit stress, respectively. They had the most indirect effect on fresh forage yield through stem diameter and plant height, respectively.

Conclusions: The significant effect of water deficit in decreasing fresh forage yield and height of sorghum plants at the reproductive growth stage indicates the sensitivity of plant to water deficit at this stage of plant growth. There was sufficient variation in the studied germplasm for fresh forage yield, height, stem diameter, and response to water deficit stress. Thus, it is possible to select the tolerant and high- yielding cultivars suitable for growing in regions with limited water resources. Based on the selected tolerance indices and principal component analysis, the most tolerant cultivars also had high yield potential in both moisture conditions. This finding indicates the ability of these indices to select tolerant cultivars with high yield potential in both moisture conditions. The results of path analysis in non-stress and water deficit conditions showed the need to study the relationships of traits separately in each moisture condition.

References:

1. Ali, M.A., Abbas, A., Niaz, S., Zulkiffal, M., Ali, S., 2009. Morphophysiological criteria for drought tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor*) at seedling and post-anthesis Stages. *International Journal of Agricultural Biotechnology* 11: 674–680.
2. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56. (FAO: Rome)
3. Ashraf, B., Yazdani, R., Mousavi-Baygi, M., Bannayan, M., 2014. Investigation of temporal and spatial climate variability and aridity of Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 118: 35–46.