تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد چهاردهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۰
۹۲۹-۹۳۸
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.3266.1835

مقاله پژوهشی

بررسی شاخص‌های تحمل و حساسیت تاج‌خروس علوفه‌ای (*Amaranthus hypochondriacus* L.) تحت شرایط کم‌آبی از طریق تجزیه به مؤلفه اصلی

علیرضا احرار[۱]، فرزاد پاکنژاد[۲*]، سید علی طباطبایی[۳]، فیاض آقایاری[۴]، الیاس سلطانی[۵]

۱. دانشجوی دکترا، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج

۲. استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج

۳. دانشیار، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد

۴. استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج

۵. دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات (پردیس ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۱/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۵

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف کم‌آبیاری بر کیفیت و کمیت عملکرد گیاه تاج‌خروس علوفه‌ای، آزمایشی در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ از طریق تجزیه‌وتحلیل کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در یک مزرعه تحقیقاتی در یزد انجام شد. عامل اصلی این مطالعه سطوح مختلف آبیاری، پس از چهار سطح تخلیه مجاز رطوبتی آب قابل‌استفاده با مقادیر ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد و عامل فرعی سه رقم مختلف گیاه تاج‌خروس علوفه‌ای شامل سیم، خارکووسکی و لوورا در نظر گرفته شد. پارامترهایی همچون عملکرد، بهره‌وری آب کشاورزی، نسبت وزن برگ به ساقه، قطر ساقه، ارتفاع بوته و درصد پروتئین خام ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که افزایش فواصل آبیاری در مقایسه با تیمار آبیاری هنگام ۵۰ درصد تخلیه آب زمین که به میزان ۵۳,۶۵ تن بر هکتار عملکرد علوفه‌تر داشت، سبب کاهش به ترتیب ۲۲، ۴۵ و ۶۲ درصدی در عملکرد علوفه‌تر و همین‌طور سبب کاهش بهره‌وری آب، قطر ساقه و ارتفاع گیاه می‌گردد، درحالی‌که باعث افزایش درصد پروتئین خام و تا حدودی نسبت برگ به ساقه می‌گردد. علاوه بر این، برای تعیین مهم‌ترین شاخص‌های تنش از تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی در سطوح مختلف کم‌آبیاری، میانگین هارمونیک و میانگین بهره‌وری به‌عنوان بهترین شاخص‌ها همراه با عملکرد علوفه خشک در شرایط تنش و بدون تنش، برای بررسی تحمل ارقام تاج‌خروس به شرایط کم‌آبی انتخاب شد. با توجه به یافته‌های میانگین‌های هارمونیک و بهره‌وری، نتیجه گرفته شد درحالی‌که رقم لوورا در شرایط بدون تنش و حتی با بروز تنش ملایم عملکرد بهتری داشت، ولی رقم سیم در شرایط تنش کم‌آبی متوسط و شدید، پایداری عملکرد بهتری از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: **آمارانت، بای‌پلات، پروتئین خام، عملکرد علوفه، کم‌آبی**

مقدمه

با توجه به جمعیت رو به فزونی ایران و اهمیت تأمین و تنوع غذا برای جامعه، نقش دام‌پروری به‌عنوان یک منبع غذایی انسان بسیار حائز اهمیت است. در این راستا مشکلات تأمین علوفه برای دام، از عوامل محدودکننده برای دام‌پروری به‌حساب می‌آید (Nakhoda et al., 2000). یکی از گیاهان زراعی که به‌عنوان منبع جدید تغذیه انسان و همچنین خوراک دام و طیور مطرح هست، گیاه تاج‌خروس است. تاج‌خروس (*Amaranthus* spp.). گیاهی پهن‌برگ باریشه عمیق، دارای ساقه اصلی و به‌عنوان یک گیاه روزکوتاه تلقی می‌شود. هرچند تاج‌خروس یک گیاه باستانی محسوب

* نگارنده پاسخگو: فرزاد پاکنژاد. پست الکترونیک: farzadpaknejad@yahoo.com

می‌شود و خصوصاً به‌عنوان علف هرز شناخته‌شده است ولی در بسیاری از مناطق، مانند ایران به‌عنوان یک علوفه‌ی جدید مطرح است (Fazaeli et al., 2011).

خاستگاه این گیاه آمریکای مرکزی است و در آن منطقه از سابقه مصرف دیرین برخوردار است. تاج‌خروس به‌صورت دانه‌ای و غیر دانه‌ای (علوفه و سبزی‌خوردن) مورد مصرف قرار می‌گیرد. ولی در دنیا استفاده از آن به‌عنوان دانه‌ای بیشتر است. در کشور آمریکا تاج‌خروس را برای تولید علوفه کشت می‌نمایند و در کشور پرو در یک‌فصل، چند چین علوفه از آن برداشت می‌نمایند (Adhikary et al., 2020) . تاج‌خروس زراعی از پتانسیل برجسته‌ای برای تغذیه حیوانات، به‌عنوان یک منبع عالی تأمین فیبر و پروتئین برخوردار است. همچنین حاوی مقادیر مناسبی اسیدهای چرب ضروری، فلاونوئیدها، استنول‌ها[1]، توکوترینول‌ها[2] و اسکالن[3] است که از آن‌یک علوفه باکیفیت برای دام خصوصاً نشخوارکنندگان، پرندگان، خرگوش‌ها و خوک می‌سازد (Peiretti, 2018).

برگ بیشتر گونه‌های زراعی تاج‌خروس به‌صورت خوراکی برای انسان و یا دام در دنیا مورد مصرف قرار می‌گیرد (Caselato-Sousa and Amaya-Farfán, 2012). راهنما و همکاران در سال ۲۰۱۷ طی تحقیقی بیان نمودند رقم لوورا؛ تاج‌خروس علوفه‌ای به‌عنوان یک رقم پر محصول قلمداد می‌شود که از کیفیت قابل‌قبول علوفه نیز برخوردار است (Rahnama and Safaeie, 2017).

تغییر شرایط آب و هوایی در سالیان اخیر، منجر به کاهش میزان بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و ازجمله کشور ایران شده است. خشکی در بین عوامل ایجادکننده تنش‌زای غیرزنده به‌تنهایی مسبب حدود ۳۰ درصد از کاهش عملکرد گیاهان زراعی در نقاط مختلف جهان بوده است (Nouri and Komatsu, 2013)؛ بنابراین، به نظر می‌رسد با توجه به الگوهای بروز خشکی، مدیریت آبیاری درزمینهٔ بهبود و یا افزایش عملکرد گیاهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش مهمی را بر عهده دارد (Gao et al., 2020).

کرمی و همکاران آزمایشی، شامل تأثیر سه سطح آبیاری و نیتروژن و زئولیت بر روی عملکرد و کیفیت یک رقم از تاج‌خروس علوفه‌ای انجام دادند. به این نتیجه دست یافتند که افزایش تنش خشکی سبب کاهش ۴۰ درصدی عملکرد علوفه خشک و ۱۸ درصدی ماده خشک قابل‌هضم و ۳۷ درصدی کلروفیل خواهد گردید (Karami et al., 2018).

محققان همواره به دنبال معرفی شاخص‌هایی برای بررسی مقاومت به تنش در ارقام مختلف گیاهی می‌باشند تا ارقام متحمل را برای فعالیت‌های به نژادی معرفی نمایند. شاخص‌های زیادی نیز در این زمینه تابه‌حال در جهان معرفی گردیده است (Sánchez-Reinoso et al., 2020).

با توجه به افزایش تقاضا برای خوراک دام و عدم تحقیقات کافی بر روی گیاه تاج‌خروس علوفه‌ای، مطالعه بر روی ویژگی‌های این گیاه ضروری به نظر می‌رسد. ازاین‌رو، با توجه به کمبود آگاهی درباره تأثیر کم آبیاری بر روی ارقام علوفه‌ای، این مطالعه باهدف بررسی تحمل ارقام گیاه تاج‌خروس نسبت به شرایط کم‌آبی از طریق مقایسه شاخص‌های مقاومت و حساسیت به تنش صورت پذیرفت. تا با تعیین ارقام مناسب، بتوان از آن‌ها در برنامه‌های اصلاحی و تهیه ارقام متحمل به خشکی استفاده نمود.

مواد و روش‌ها

با توجه به جدید بودن گیاه زراعی تاج‌خروس علوفه‌ای در منطقه یزد، همچنین احتیاج شدید به گیاهان و ارقام مقاوم به تنش خشکی در منطقه، آزمایشی به‌منظور بررسی تأثیر تیمارهای مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد و اجزاء عملکرد ارقام تاج‌خروس علوفه‌ای و همچنین شناسایی شاخص‌های مقاومت به تنش که قادر به تمایز ژنوتیپ‌های برتر باشند، صورت گرفت. این آزمایش در یک مزرعه تحقیقاتی در شهر یزد صورت گرفت. این مزرعه با موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی و ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه غربی با ارتفاع ۱۲۱۵ متری از سطح دریا در استان یزد واقع‌شده است. مساحتی حدود ۲۰۰۰ مترمربع که در سال قبل از شروع آزمایش به‌صورت آیش قرار داشت، قبل از کاشت با گاوآهن برگردان دار شخم و با دو دیسک عمود بر هم کلوخه‌ها خرد و سپس تسطیح گردید. ارقام مورد آزمایش از موسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه گردید و در اواسط اردیبهشت‌ماه در دو سال پیاپی (۱۳۹۷-۱۳۹۸) در کرت‌هایی به مساحت ۴۰ مترمربع کاشت گردید. وضعیت هواشناسی محل موردبررسی در جدول ۱ آمده است. در هر کرت فرعی ۱۵ خط کاشت به طول هرکدام ۴ متر و فاصله بین خطوط و بوته

[1] stanols
[2] tocotrienols
[3] squalene

به ترتیب ۶۰ و ۱۰ سانتیمتر با تراکم حدود ۱۶۶ هزار بوته در هکتار در نظر گرفته شد. کود دهی با توجه به آزمون خاک قبل و حین آزمون انجام شد (جدول ۲). کاشت به‌صورت خشکه‌کاری روی ردیف صورت گرفت و بلافاصله اولین آبیاری انجام شد.

جدول ۱. داده‌های هواشناسی مزرعه آزمایشی (در ماه‌های مورد انجام آزمایش)

Table 1. Climatic data of the experimental site (During the months of the experiment).

Month ماه	Temperature (°C) دما			رطوبت نسبی Relative Humidity (%)	نرخ تبخیر Evaporation Rate (mm)	بارندگی ماهیانه Monthly Rainfall (mm)
	Mean of Max. میانگین حداکثر	Mean of Min. میانگین حداقل	Daily ave. میانگین روزانه			
May 2018	34.95	21.08	28.34	19.78	12.63	7.8
June 2018	39.87	24.79	33.12	8.59	15.97	0
July 2018	39.25	25.82	33.08	11.22	16.34	0
May 2019	30.78	18.35	24.75	28.77	9.86	8.5
June 2019	39.04	25.21	32.47	12.69	15	0
July 2019	39.32	24.36	32.90	7.40	16.02	0

برای انجام این بررسی از آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار بهره گرفته شد؛ که فاکتور اصلی شامل چهار سطح از تخلیه مجاز رطوبتی آب قابل‌استفاده برای گیاه (۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪) در نظر گرفته شد و ارقام لوورا و سیم و خارکووسکی که همگی جز خانواده Amaranthus hypochondriacus هستند؛ فاکتور فرعی آزمون را تشکیل دادند. در این مطالعه به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک از دستگاه دقیق TDR (6050X1 TRASE 1) استفاده گردید. ازآنجایی‌که این وسیله رطوبت را به‌صورت حجمی نشان می‌دهد برای محاسبه آب قابل‌استفاده گیاه ابتدا رطوبت ظرفیت زراعی به روش مزرعه‌ای محاسبه گردید و هم‌زمان حد رطوبت پژمردگی دائم گیاه به روش گلدانی به دست آمد (جدول ۲). سپس رطوبت قابل‌استفاده برای گیاه از اختلاف آن دو محاسبه گردید (Kirkham, 2005).

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه؛ قبل از انجام آزمایش (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری)

Table 2. Physical and chemical properties of the soil in the field before planting process (0–30 cm).

Year	سال	K (p.p.m)	P (p.p.m)	N (%)	O.C (%)	pH	EC (dS/m)	FC Θ_V	PWP Θ_V	بافت خاک Soil texture
2018	**۱۳۹۷**	157	13.6	0.017	0.205	7.2	4.9	24.4	10.8	**Sandy clay loam**
2019	**۱۳۹۸**	138	7.3	0.021	0.254	7.2	4.5	-	-	**Sandy clay loam**

O.C: کربن آلی؛ EC: هدایت الکتریکی؛ FC: ظرفیت زراعی؛ PWP: نقطه پژمردگی دائم؛ Θ_V: رطوبت حجمی.

O.C: Organic Carbon; EC: Electrical Conductivity; FC: Field Capacity; PWP: Permanent Wilting Point; Θ_V: Volumetric Humidity.

آبیاری به‌صورت منظم برای تمام تیمارهای آزمایش هم‌زمان با ۵۰٪ تخلیه آب قابل‌استفاده برای گیاه تا زمان استقرار گیاهچه‌ها صورت گرفت سپس تیمارهای خشکی اعمال گردید. بدین منظور پروب های دستگاه TDR در تکرارهای وسط آزمون به‌صورت دائم تا پایان آزمایش در زیرخاک قرار گرفت و با استفاده از داده‌های آن تیمارهای ۶۰ و ۷۰ و ۸۰ درصد تخلیه آب قابل‌استفاده برای گیاه اعمال گردید. همچنین میزان آبیاری هر کرت از طریق کنتور اندازه‌گیری شد. در پایان دو سال برای اندازه‌گیری عملکرد علوفه‌تر و خشک تاج‌خروس از ترازوی دقیق استفاده گردید، بدین منظور مساحت ۴ مترمربع از وسط هر کرت با حذف اثر حاشیه برداشت صورت گرفت و تمامی بوته‌ها وزن گردید و

همچنین از هر کرت آزمایشی تعداد ۵ بوته به‌صورت تصادفی انتخاب گردید و وزن‌تر و خشک ساقه و برگ و ارتفاع بوته و قطر ساقه اندازه‌گیری شد (Rahnama and Safaeie, 2017). در این مطالعه همچنین برای اندازه‌گیری بهره‌وری آب کشاورزی با استفاده از بوته‌های خشک از فرمول زیر استفاده گردید (Cook et al., 2006).

$$\text{بهره‌وری آب کشاورزی } (kg.m^{-3}) = \frac{\text{عملکرد علوفه خشک } (kg)}{\text{میزان آبیاری } (m^3)} \quad [۱]$$

برای اندازه‌گیری درصد پروتئین از روش کجلدال استفاده گردید و از میزان ازت موجود در نمونه درصد پروتئین خام بوته تخمین زده شد (Kjeldahl, 1883). برای محاسبه میزان مقاومت و پایداری به تنش خشکی از شاخص‌های شناخته‌شده‌ای استفاده گردید که فرمول آن‌ها در ادامه آمده است. با این فرض که تیمار ۵۰٪ کم آبیاری شرایط عاری از تنش خشکی دارد و سه سطح دیگر؛ شامل کم آبیاری ۶۰٪ تنش خشکی ملایم و کم آبیاری ۷۰٪ تنش خشکی متوسط و کم آبیاری ۸۰٪ تنش خشکی شدید دارد در محاسبات استفاده گردیدند. همچنین لازم به ذکر است در این مطالعه برای این منظور از عملکرد خشک ارقام تاج‌خروس استفاده‌شده است.

شاخص میانگین بهره‌وری (Rosielle and Hamblin 1981):

$$MP = (Y_P + Y_S)/2 \quad [۲]$$

شاخص تحمل به تنش (Rosielle and Hamblin 1981)

$$Tol = Y_P - Y_S \quad [۳]$$

شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (Fernandez 1992)

$$GMP = \sqrt{Y_S \times Y_P} \quad [۴]$$

شدت تنش (Fischer and Maurer 1978)

$$SI = 1 - (\overline{Y}_S / \overline{Y}_P) \quad [۵]$$

شاخص حساسیت به تنش (Fischer and Maurer 1978)

$$SSI = (1 - Y_S/Y_P)/SI \quad [۶]$$

شاخص تحمل به تنش (Fernandez 1992)

$$STI = (Y_S \times Y_P)/(\overline{Y}_P)^2 \quad [۷]$$

شاخص پایداری عملکرد (Bouslama and Schapaugh 1984)

$$YSI = Y_S/Y_P \quad [۸]$$

شاخص میانگین هارمونیک بهره‌وری (Fernandez 1992)

$$HM = (2 \times Y_P \times Y_S)/(Y_P + Y_S) \quad [۹]$$

نرخ کاهش عملکرد(Gavuzzi et al. 1997)

$$Yr = 1 - (Y_S/Y_P) \quad [۱۰]$$

شاخص نسبی خشکی (Bidinger et al. 1987)

$$RDI = (Y_S/Y_P)/(\overline{Y}_S/\overline{Y}_P) \quad [۱۱]$$

لازم به ذکر است، در فرمول‌های فوق Ys، Yp و $\overline{Y}_S$، $\overline{Y}_P$ به ترتیب بیانگر عملکرد در شرایط تنش، عملکرد در شرایط بدون تنش، میانگین عملکرد در شرایط تنش و میانگین عملکرد در شرایط بدون تنش می‌باشند.

در این مطالعه به‌منظور تجزیه واریانس داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.4 بهره گرفته شد و از آزمون بارتلت باهدف اطمینان از یکنواختی واریانس خطاها استفاده گردید. آن دسته از صفاتی که در دو سال متوالی دارای واریانس خطای همگن بودند به‌صورت تجزیه مرکب آنالیز شدند. برای مقایسه میانگین تمام صفات از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید. همچنین ترسیم نمودارها و انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از نرم‌افزار Statgraphics 18 انجام شد

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر، براثر تیمار کم‌آبیاری در سطوح مختلف طی دو سال انجام آزمایش اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بین هیچ‌کدام از صفات موردبررسی مشاهده نگردید (جدول ۳) بنابراین تجزیه مرکب برای دو سال در همگی صفات صورت پذیرفت که نتایج بررسی آن‌ها در جدول ۳ آمده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده نسبت برگ به ساقه در سطح احتمال ۵ درصد و سایر پارامترها در سطح احتمال ۱٪ ازنظر آبیاری هنگام سطوح مختلف تخلیه آب معنی‌دار بودند و ارقام موردبررسی نیز ازنظر عملکرد علوفه‌تر، قطر ساقه و همچنین پروتئین خام در سطح ۵ درصد باهم دارای اختلاف معنی‌دار بودند که نشان از تنوع ژنتیکی این ارقام داشت. بالاترین عملکردتر مربوط به شرایط بدون تنش با میزان ۵۳,۶۵ تن بر هکتار و پایین‌ترین عملکرد متعلق به شرایط حداکثر تنش به میزان ۲۰,۱۲ تن بر هکتار به دست آمد. بر اساس روش برش-دهی اثرات متقابل مشخص گردید که با افزایش سطح کم-آبیاری عملکرد علوفه‌تر در ارقام تاج‌خروس به شکل

معنی‌داری کاهش می‌یابد؛ به شکلی که رقم لوورا و سیم در شرایط آبی ۵۰ درصد تخلیه رطوبت بالاترین عملکرد را داشتند و درعین‌حال رقم لوورا و خارکووسکی در شرایط آبی ۸۰ درصد تخلیه رطوبت پایین‌ترین عملکرد را از خود نشان دادند. کرمی و همکاران در سال ۲۰۱۸ درباره کاهش عملکرد تاج‌خروس در تنش خشکی به نتایج مشابهی دست یافتند (Karami et al., 2018). این در حالی است که بهره‌وری آب کشاورزی نیز نتایجی مشابه عملکرد، از خود نشان داد که دلایل زیر را می‌توان برای آن برشمرد: گیاه تاج‌خروس دوره رشد کوتاهی تا زمان برداشت به‌منظور علوفه دارد، اعمال تیمار تنش به علت حساسیت بالای این گیاه بعد از جوانه‌زنی به تنش خشکی در هنگام استقرار

جدول ۳. تأثیر تیمارهای کم‌آبیاری بر روی مؤلفه‌های عملکرد سه رقم تاج‌خروس علوفه‌ای و برهمکنش آن‌ها در دو سال پیاپی

Table 3. Effect of irrigation deficit treatments on the yield parameters of three cultivars of forage Amaranth and their interactions in the two successive years

تیمارها Treatments		عملکرد علوفه تر Fresh Yield	بهره‌وری آب Water Productivity	نسبت برگ به ساقه Leaf to Stem Ratio	قطر ساقه Stem diameter	ارتفاع گیاه Plant height	پروتئین خام Crude Protein
		ton.ha^{-1}	kg.m^{-3}		mm	cm	%
Year	*سال*						
2018	**۱۳۹۷**	35.52	3.21	0.49	17.89	120.46	15.27
2019	**۱۳۹۸**	36.71	3.39	0.50	18.19	123.69	15.16
Significance	**معنی‌داری**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
سطوح کم‌آبیاری							
irrigation deficit *levels*							
water-deficit 50% (1)		53.65 ^{a}	4.42 ^{a}	0.38 ^{c}	21.96 ^{a}	151.1 ^{a}	13.50 ^{d}
water-deficit 60% (2)		41.72 ^{b}	3.74 ^{b}	0.46 ^{bc}	20.55 ^{b}	138.1 ^{b}	14.62 ^{c}
water-deficit 70% (3)		28.98 ^{c}	2.86 ^{c}	0.54 ^{ab}	16.05 ^{c}	108.6 ^{c}	15.66 ^{b}
water-deficit 80% (4)		20.12 d	2.21 ^{d}	0.61 ^{a}	13.57 ^{d}	90.4 ^{d}	17.11 ^{a}
Significance	**معنی‌داری**	**	**	*	**	**	**
Genotypes	***ارقام***						
Cim (C)		38.55 ^{a}	3.54	0.49	18.66 ^{a}	125.8	14.66 ^{b}
Kharkovski(Kh)		31.99 ^{b}	2.94	0.5	16.8 ^{b}	112.0	15.94 ^{a}
Loura(L)		37.82 ^{a}	3.44	0.5	18.65 ^{a}	128.3	15.07 ^{b}
Significance	**معنی‌داری**	*	ns	ns	*	ns	*
Interaction	***اثر متقابل***						
(1)×(C)		56.24 ^{a}	4.63 ^{ab}	0.45	22.39 ^{a}	152.5 ^{a}	13.02 ^{h}
(1)×(Kh)		46.32 ^{bc}	3.81 ^{c}	0.38	21.27 ^{bc}	147.0 ^{a}	14.35 ^{f}
(1)×(L)		58.40 ^{a}	4.81 ^{ab}	0.32	22.23 ^{ab}	153.8 ^{a}	13.13 ^{h}
(2)×(C)		42.19 ^{c}	3.79 ^{c}	0.46	19.89 ^{d}	130.2 ^{c}	13.95 ^{g}
(2)×(Kh)		36.24 ^{d}	3.25 ^{d}	0.45	20.29 ^{dc}	138.0 ^{bc}	14.86 ^{e}
(2)×(L)		46.74 ^{b}	4.19 ^{bc}	0.48	21.49 ^{ab}	146.1 ^{ab}	15.05 ^{e}
(3)×(C)		33.15 ^{d}	3.27 ^{d}	0.53	16.91 ^{e}	118.9 ^{d}	14.79 ^{e}
(3)×(Kh)		27.51 ^{e}	2.72 ^{e}	0.55	15.06 ^{g}	93.3 ^{e}	16.56 ^{c}
(3)×(L)		26.28 ^{ef}	2.59 ^{ef}	0.56	16.19 ^{ef}	113.5 ^{d}	15.65 ^{d}
(4)×(C)		22.62 ^{fg}	2.48 ^{ef}	0.56	15.43 ^{fg}	101.6 ^{e}	16.88 ^{b}
(4)×(Kh)		17.88 ^{h}	1.96 ^{g}	0.62	10.60 ^{h}	69.8 ^{f}	17.98 ^{a}
(4)×(L)		19.85 ^{gh}	2.18 ^{fg}	0.67	14.68 ^{g}	99.8 ^{e}	16.47 ^{c}
Significance	**معنی‌داری**	*	*	ns	**	**	**
CV (%)	**ضریب تغییرات**	12.02	12.86	9.46	8.91	9.47	5.02

مقادیری که در هر ستون دارای حروف مشابه می‌باشند ازنظر آماری در سطح ٪۵ بر طبق آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند و ns,* ,** به ترتیب نشان از عدم معنی‌داری در سطح ٪۵ و معنی‌داری در سطح ۵ درصد و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.

Values within one column followed by different letters are significantly different at P≤0.05 according to Duncan's test. ^{ns}, no significance (P≤0.05). *, **, significance at P≤0.05, P≤0.01, respectively

بوته‌ها صورت پذیرفت، هدف از کاشت این گیاه برداشت قسمت هوایی به‌عنوان علوفه است درحالی‌که مستقیماً این بخش با کاهش عملکرد روبروست و مثلاً اگر هدف برداشت دانه بود قطعاً عکس این اتفاق رخ می‌داد. نسبت وزن برگ به ساقه در برهمکنش تیمارها دارای اختلاف معنی‌دار آماری نبود. ولی قطر و ارتفاع بوته‌ها در همه ارقام با بالا رفتن سطح کم‌آبیاری به شکل معنی‌داری کاهش یافت؛ اما درصد پروتئین خام به‌گونه‌ای متفاوت رقم خورد, با افزایش سطح کم‌آبیاری این درصد نیز افزایش یافت تا جایی که بالاترین درصد پروتئین در رقم خارکووسکی در شرایط حداکثر تنش مشاهده گردید (جدول ۳).

در همین راستا طی مطالعه‌ای، مشخص گردید قطع آبیاری می‌تواند سبب بالا رفتن میزان نیتروژن در برگ برخی ارقام تاج‌خروس شود. هرچند با طولانی شدن این تنش با انتقال این نیتروژن به جوانه‌ها و بذور این سطح در برگ‌ها کاهش خواهد یافت (Nabhan, 1986). نتایج تجزیه واریانس بیانگر تفاوت بین ارقام در سطوح مختلف کم‌آبیاری بود. باهدف تبیین چگونگی تحمل ارقام در سطوح مختلف کم-آبیاری از شاخص‌های تنش استفاده گردید. بدین منظور میانگین عملکرد علوفه خشک ارقام در شرایط تنش و عاری از تنش و نیز مقادیر عددی شاخص‌های تحمل به تنش در جدول ۴ ارائه‌شده است؛ که بر اساس آن رقم لوورا که در شرایط بدون تنش بالاترین عملکرد علوفه خشک را داشته، در شرایط تنش خشکی ملایم هم توانسته است این غالبیت را حفظ کند ولی در شرایط تنش متوسط و شدید رقم سیم توانسته است مقاومت بیشتری از خود نشان داده و عملکرد علوفه خشک بالاتری از ارقام دیگر داشته باشد و این در حالی است که رقم خارکووسکی پایین‌ترین عملکرد را چه در شرایط بدون تنش و چه در شرایط تنش ملایم و شدید دارا بود (جدول ۴).

جدول ۴. مقایسه میانگین شاخص‌های تحمل و پایداری تنش در ارقام تاج‌خروس علوفه‌ای در دو سال متوالی

Table 4. Comparison of the mean of stress tolerance and susceptibility indices in the cultivars of forage Amaranth in the two successive years

ارقام Genotypes	Yp (ton.ha^{-1})	Ys (ton.ha^{-1})	MP	TOL	GMP	SSI	STI	YSI	HM	Yr	RDI
			mild drought stress			تنش خشکی ملایم					
Cim	8.07	6.19	7.13	1.88	7.05	0.97	49.94	0.77	6.97	0.22	1.00
Kharkovski	6.56	5.39	5.97	1.16	5.93	0.92	35.53	0.83	5.89	0.16	1.01
Loura	8.14	6.96	7.55	1.18	7.52	1.00	57.36	0.85	7.49	0.14	1.00
			moderate drought stress			تنش خشکی متوسط					
Cim	8.07	5.23	6.65	2.84	6.48	0.98	42.14	0.65	6.32	0.34	1.00
Kharkovski	6.56	4.85	5.70	1.70	5.63	0.97	32.14	0.74	5.56	0.25	1.01
Loura	8.14	4.25	6.19	3.89	5.83	0.79	34.28	0.53	5.50	0.46	1.02
			mild drought stress			تنش خشکی شدید					
Cim	8.07	4.15	6.11	3.92	5.74	0.99	33.56	0.51	5.40	0.48	1.00
Kharkovski	6.56	3.15	4.86	3.40	4.52	0.98	20.75	0.49	4.21	0.50	1.01
Loura	8.14	3.80	5.97	4.34	5.49	0.22	30.66	0.48	5.08	0.51	1.02

Cim: سیم، Kharkovski: خارکووسکی، Loura: لوورا

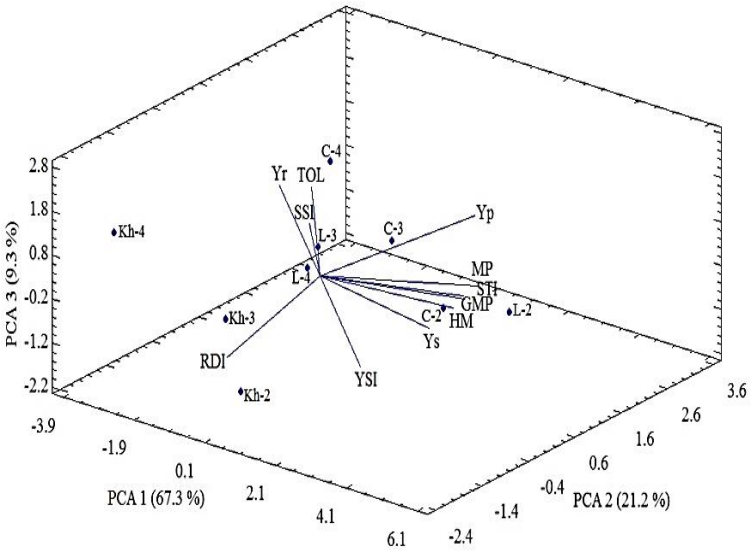
Yp: عملکرد علوفه تازه ارقام در شرایط عاری از تنش؛ Ys: عملکرد علوفه تازه ارقام در شرایط تنش خشکی؛ MP: میانگین بهره وری؛ TOL: شاخص تحمل؛ GMP: میانگین هندسی بهره وری؛ SSI: شاخص حساسیت به تنش؛ STI: شاخص مقاومت به تنش؛ YSI: شاخص پایداری عملکرد؛ HM: میانگین هارمونیک؛ Yr: نرخ کاهش عملکرد؛ RDI: شاخص نسبی خشکی

Yp, fresh mean yield of the genotype under non-stress conditions; Ys, fresh mean yield of the genotype under stress conditions; MP, mean productivity; TOL, tolerance; GMP, geometric mean productivity; SSI, stress susceptibility index; STI, stress tolerance index; YSI, yield stability index; HM, harmonic mean; Yr, Yield reduction rate; RDI, relative drought index.

باهدف ارزیابی ارقام ازنظر شاخص‌های تنش و تعیین بهترین شاخص‌های تحمل به تنش برای نشان دادن پایداری ارقام از آزمون تجزیه به مؤلفه اصلی بهره گرفته شد (شکل ۱). بر اساس نتایج مندرج در شکل ۱ عملکرد در شرایط تنش با توجه به اینکه کمترین زاویه مثبت را با شاخص HM دارد به‌عنوان مؤلفه اول ۶۷/۳ از تغییرات را شامل می‌شوند و اما

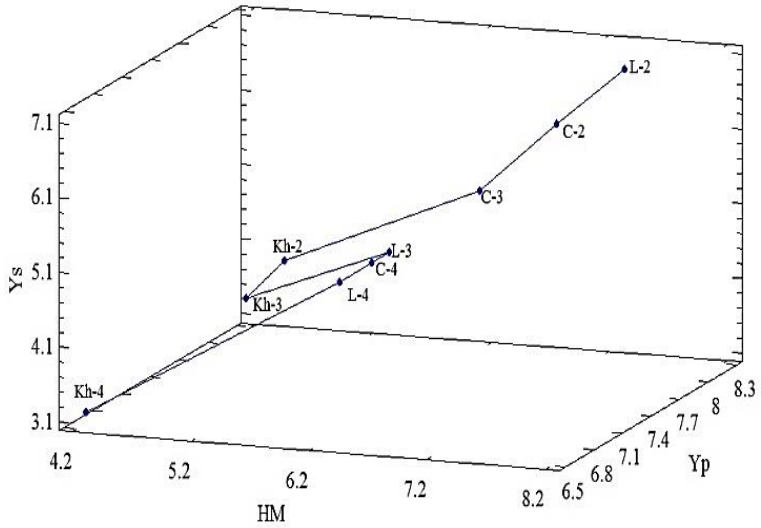
GMP, STI, MP, Yp هم همبستگی مثبتی را با آن‌ها نشان دادند ولی سایر شاخص‌ها دارای همبستگی منفی با آن‌ها بودند. بر اساس نتایج شکل ۱ با توجه به اینکه شاخص‌های HM و MP به ترتیب بیشترین همبستگی را با عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی اول و دوم داشتند انتخاب گردیدند تا با رسم شکل ۲ و ۳ جایگاه ارقام ازنظر مقاومت و پایداری در سطوح مختلف تنش مشخص گردد. در این شکل‌ها خطی ارقام را به ترتیب ازنظر محور افقی مرتب نموده است. بر اساس شکل ۲ درمی‌یابیم که رقم لوورا باوجودی که بالاترین عملکرد علوفه خشک را حتی در شرایط تنش ملایم دارا است؛ اما در شرایط تنش متوسط پایین‌ترین مقدار شاخص میانگین هارمونیک بهره‌وری را دارا است و حتی از رقم خارکووسکی هم شرایط ضعیف‌تری دارد؛ ولی در شرایط تنش شدید رقم خارکووسکی همانند شرایط تنش ملایم کمترین میانگین هارمونیک بهره‌وری را دارا است.

با مشاهده شکل ۳ درمی‌یابیم که رقم سیم باوجودی که ازنظر عملکرد و شاخص میانگین بهره‌وری در شرایط تنش ملایم جایگاه پایین‌تری نسبت به رقم لوورا داراست؛ اما در شرایط تنش متوسط و شدید با شیب زیادی عملکرد بهتری نسبت به دو رقم دیگر دارا است. این در حالی است که ازنظر شاخص MP رقم خارکووسکی عملکرد خوبی نسبت به دو رقم دیگر از خود نشان نمی‌دهد. تا جایی که در شرایط تنش ملایم میانگین بهره‌وری علوفه خشک آن ۵,۹۷ است؛ که این عدد برابر رقم لوورا در شرایط تنش شدید و کمتر از میانگین بهره‌وری سیم با عدد ۶,۱۱ است. این نشان از تنوع ژنتیکی بین ارقام موردمطالعه داشت (جدول ۴). گودرزوند و همکاران (Goodarzvand Chegini, et al., 2017) و همچنین راهی و همکاران (Rahi, et al.,2020) از مؤلفه اصلی شاخص‌های تنش برای انتخاب ارقام برتر در مطالعات خود بهره بردند



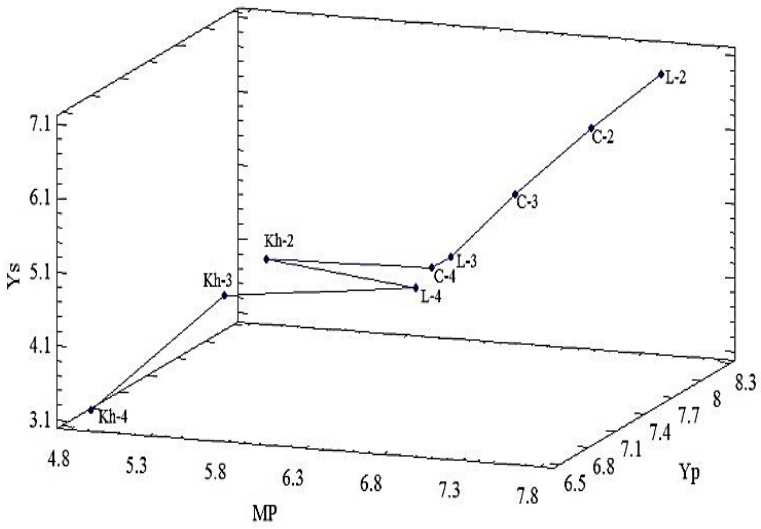
شکل ۱. بای‌پلات سه مؤلفه اصلی اول مبتنی بر عملکرد علوفه خشک در شرایط تنش و عاری از تنش خشکی با محوریت شاخص‌های تحمل به تنش برای سه رقم تاج‌خروس علوفه‌ای. PCA1، PCA2،PCA3 به ترتیب اولین، دومین و سومین مؤلفه اصلی می‌باشند. C: رقم سیم، Kh: رقم خارکووسکی، L: رقم لوورا. ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب تخلیه آب قابل‌استفاده برای گیاه به میزان ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد.

Fig. 1. 3D biplot of the first three principal components based on dry forage yield in drought stress and non-stress conditions with a focus on drought tolerance indices for three genotypes of fodder amaranth. PCA1, PCA2 and PCA3; First, second and third principal component respectively. C: Cim, KH: Kharkovski, L: Loura. 2, 3 and 4: 60, 70 and 80% plant available water depletion, respectively.



شکل ۲. مقایسه عملکرد سه‌بعدی ارقام تاج‌خروس در شرایط تنش خشکی و بدون تنش با شاخص میانگین هارمونیک. C: رقم سیم، Kh: رقم خارکووسکی، L: رقم لوورا. ۲، ۳ و ۴ به ترتیب تخلیه آب قابل‌استفاده برای گیاه به میزان ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد.

Fig. 2. 3D yield comparison of amaranth genotypes under drought stress and non-stress conditions with harmonic mean efficiency index. C: Cim, KH: Kharkovski, L: Loura. 2, 3 and 4: 60, 70 and 80% plant available water depletion, respectively.



شکل ۳. مقایسه عملکرد سه‌بعدی ارقام تاج‌خروس در شرایط تنش خشکی و بدون تنش با شاخص میانگین بهره‌وری. C: رقم سیم، Kh: رقم خارکووسکی، L: رقم لوورا. ۲، ۳ و ۴ به ترتیب تخلیه آب قابل‌استفاده برای گیاه به میزان ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد.

Fig. 3. 3D yield comparison of amaranth genotypes under drought stress and non-stress conditions with mean productivity index. C: Cim, KH: Kharkovski, L: Loura. 2, 3 and 4: 60, 70 and 80% plant available water depletion, respectively.

نتیجه‌گیری نهایی

باوجود تحمل تاج‌خروس، در برابر شرایط اقلیمی متنوع و کاربردهای شگفت‌انگیز در صنایع غذایی و علوفه‌ای در جهان، به نظر می‌رسد که گیاه تاج‌خروس علوفه‌ای هنوز موردتوجه بسیاری از محققان قرار نگرفته است. نتایج این پژوهش نشان داد که گیاه تاج‌خروس علوفه‌ای بسیار تحت تأثیر کمبود آب است تا جایی که پارامتر بهره‌وری آب (WP) به ترتیب در شرایط کم‌آبیاری ملایم، متوسط و شدید دارای افت

قابل‌توجهی به مقادیر ۱۵، ۳۵ و ۵۰ درصد می‌شود؛ اما باوجوداین کاهش عملکرد، به نظر می‌رسد با توجه به کیفیت علوفه تاج‌خروس، حجم تولیدی نسبتاً مطلوب در هکتار و با توجه به دوره زراعت کوتاه این گیاه، می‌توان آن را یک گزینه مطلوب حتی در مناطق کم آب بشمار آورد. علاوه بر این‌یکی از اهداف این مطالعه انتخاب شاخص تنش مطلوب برای انتخاب رقم برتر، ازنظر تحمل به خشکی بود؛ با تجزیه به مؤلفه اصلی که صورت گرفت، دریافتیم که می‌توان از شاخص‌های Hm و MP در کنار عملکرد در شرایط تنش و عاری از تنش نسبت به بقیه شاخص‌های تنش بهره بیشتری گرفت. از نتایج حاصل از آن‌ها درمی‌یابیم که رقم سیم عملکرد به‌مراتب بهتری در شرایط تنش از خود نشان داد. پس می‌توان رقم سیم را به‌عنوان رقم قابل توصیه برای فعالیت‌های به نژادی انتخاب نمود. ازآنجاکه در این مطالعه تیمارهای تنش با توجه به کشاورزی معمول منطقه انتخاب شدند. به نظر می‌رسد استفاده از تیمارهای تنش ملایم‌تر در تحقیقات آینده می‌تواند در افزایش بهره‌وری آب مؤثر باشد. همچنین ممکن است منجر به افزایش عملکرد شود.

منابع

Adhikary, D., Khatri-Chhetri, U., Slaski, J., 2020. Amaranth: An Ancient and High-Quality Wholesome Crop. Nutritional Value of Amaranth. IntechOpen .pp. 57-66.

Bidinger, F., Mahalakshmi, V., Rao G., 1987. Assessment of drought resistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* L. Leeke). II. Estimation of genotype response to stress. Australian Journal of Agricultural Research. 38, 49-59.

Bouslama, M., Schapaugh, W., 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. Crop science. 24(5), 933-937.

Caselato-Sousa, V.M., Amaya-Farfán, J., 2012. State of knowledge on amaranth grain: a comprehensive review. Journal of Food Science. 77, 93-104.

Cook, S., Gichuki, F., Turral, H., 2006. Water productivity: Estimation at plot, farm and basin scale. People and Agro-Ecosystems Research for Development Challenge; CIAT: Cali, Colombia.144.

Fazaeli. H., Ehsani. P., Safayee. AR., Mehrani, A., 2011. Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) as a new forage source. p. 19-20. In Proceedings of the 5th International Conference. Oct. 2011. Balkan Conference on Animal Science, Bucharest, Romania.

Fernandez, G.C., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress, Aug. 13-16. Shanhua, Taiwan.

Fischer, R., Maurer, R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. Australian Journal of Agricultural Research. 29, 897-912.

Gao, S., Wang, Y., Yu, S., Huang, Y., Liu, H., Chen, W., He, X., 2020. Effects of drought stress on growth, physiology and secondary metabolites of two adonis species in Northeast China. Scientia Horticulturae. 259, 108795.

Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campanile, R., Ricciardi, G., 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.

Goodarzvand Chegini, Kh., Fotovat, R., Bihamta, M.R., Omidi, M., Shahnejant Boushehri, A., 2017. Grouping of tolerance indices and response of Kabuli and Desi type chickpea genotypes to drought stress. Iranian Journal of Field Crop Science. 48, 647-664. [In Persian with English Summary].

Karami, S., Hadi, H., Tajbakhsh, SM., Modaress, S., 2018. Effect of different levels of nitrogen and zeolite on chlorophyll content, Quantity and quality of Amaranth forage under deficit irrigation stress. Journal of Crops Improvement. [In Persian with English Summary].

Kirkham, M., 2005. Field capacity, wilting point, available water, and the non-limiting water range. Principles of soil and plant water relations.101-115.

Kjeldahl, J., 1883. Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen körpern. Zeitschrift für analytische Chemie. 22, 366-382.

Nabhan G.P., 1986. Gathering the Desert. University of Arizona Press. USA.

Nakhoda, B., Hashemi-Dezfouli, A., Banisadr, N., 2000. Water stress effects on forage yield and quality of pearl millet. Iranian Journal of Agricultural Sciences. 31, 701-712. [In Persian with English Summary].

Nouri, M.Z., Komatsu, S., 2013. Subcellular protein overexpression to develop abiotic stress tolerant plants. Frontiers in Plant Science. 4: 2.

Peiretti, P.G., 2018. Amaranth in animal nutrition: A review. Livestock Research for Rural Development, 30(5). pp. 1-20.

Rahnama, A., Safaeie, AR., 2017. Performance comparison of three varieties of Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) at different harvest time. Journal of Asian Scientific Research. 7, 224-230.

Rahi AR, Najafi Zarrini H, Ranjbar G, Ghajar Spanlou M. 2020. Identification of drought tolerant genotypes of soybean plant using principal component analysis and cluster analysis. Environmental Stresses in Crop Sciences. 13, 27-40. [In Persian with English Summary].

Rosielle, A., Hamblin, J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. Crop Science. 21, 943-946.

Sánchez-Reinoso, AD., Ligarreto-Moreno, GA., Restrepo-Díaz, H., 2020. Evaluation of drought indices to identify tolerant genotypes in common bean bush (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Integrative Agriculture. 19, 99-107.