University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 16, No. 2, pp. 517-530 (Summer 2023)

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4779.2069

Original article

Evaluation of yield and drought tolerance indices of cow cockle (*Vaccaria hispanica* (Mill.) Rauschert) ecotypes

N. Solat Petloo[1], R. Asghari Zakaria[2*], A. Ebadi[3],P. Sharifi Ziveh[4]

1. Former MSc Student of Plant Genetics and Breeding, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghgh Ardabili, Ardabil, Iran
2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
3. Associate Professor, Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Moghan, University of Mohaghgh Ardabili, Ardabil, Iran
4. Assistant Professor, Moghan Agricultural Research Center, Ardabil, Iran

Received 18 October 2021; Accepted 27 November 2021

Extended abstract

Introduction

The cow cockle (*Vaccaria hispanica* (Mill.) Rauschert) is an annual plant of the Caryophyllaceae family with a chromosome number of (2n=2x=30). This plant grows upright to a height of 30 to 100 cm with several branches and has great potential for producing medicinal products due to its triterpenoid saponins. In arid and semi-arid regions, plants experience periods of lack of moisture during their growth period and must be able to tolerate these periods to produce a proper yield. This experiment was aimed at investigating the drought stress responses of different *V. hispanica* ecotypes and evaluating their drought stress tolerance.

Materials and methods

This experiment was performed as a split-plot experiment based on a randomized complete block design with three replications in 2020-2021 at Parsabad Agricultural Station. The main plots were allocated to three treatments of non-stress, moderate and severe stress (irrigation cycles of 7, 10, and 14 days, respectively), and sub-plots were assigned to eight native cow cockle ecotypes collected from different northwestern regions of Iran. Seeds were sown directly in the soil at a rate of 5.5 to 8 kg per hectare with a depth of 1-2 cm, and a row spacing of 20 cm. Irrigation operations were performed similarly for all experimental units up to the beginning of stem elongation, after which the irrigation intervals for applying stress were increased. At maturity, seed yield, biomass, and harvest index were recorded and various tolerance and sensitivity indices were calculated using the yield of each ecotype under non-stress conditions (Yp) and stress conditions (Ys).

Results and discussion

The results of the analysis of variance showed that the effects of irrigation regime, ecotype and their interaction were significant in terms of seed yield, biological yield and harvest index. Ecotype 6 had the lowest decrease in grain yield per unit area and harvest index under stress conditions. In terms of yield stability and drought tolerance indices, harmonic mean yield, geometric mean yield and mean productivity, the lowest values in moderate and severe stress conditions were related to ecotypes 7 and

[*] Corresponding author: Rasool Asghari Zakaria; E-Mail: r-asghari@uma.ac.ir

© 2023, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

1, respectively, and the highest values of these indices were related to ecotype 6 in both stress conditions. Estimation of SIIG index for different ecotypes showed that ecotype 6 had the highest amount of the SIIG in both moderate and severe stress conditions. Ecotypes 4 and 3 in moderate and severe stress conditions were in the next rank and were classified as ecotypes with relatively high drought tolerance. In moderate stress conditions, ecotypes 7 and 8 and in severe stress conditions, ecotypes 1 and 7 with the lowest SIIG showed high sensitivity to drought stress. Factor analysis based on principal component analysis (PCA) showed that the first two factors with specific values greater than one, in both moderate and severe stress conditions had 95.58% and 97.18% of the total variance, respectively. According to the MGIDI index, in moderate stress conditions, ecotype 6 had the lowest value and was considered the most tolerant ecotype to drought stress, followed by ecotypes 4 and 3. In severe stress conditions, after ecotype 6, ecotypes 3 and 4 were in the next rank.

Conclusion

Estimation of the ideal genotype selection index (SIIG) and the multi-trait genotype–ideotype distance index (MGIDI) for different ecotypes based on all tolerance indices showed that ecotype 6 had the highest SIIG and the lowest MGIDI in both stress conditions followed by ecotypes 4 and 3. Ecotypes 1, 7, and 8 with the lowest SIIG and the highest MGIDI showed high sensitivity to drought stress. Therefore, among the studied ecotypes, ecotype 6 can be considered as the most tolerant ecotype to drought stress. At all, it can be concluded that the studied ecotypes have sufficient genetic diversity to be used in breeding programs with the aim of obtaining lines with higher tolerance to drought stress. The use of SIIG and MGIDI indices in crop selection programs can also be considered more.

***Keywords*:** Drought stress, Multi-trait genotype–ideotype distance index (MGIDI), SIIG Selection Index, Stress tolerance indices

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد شانزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۲

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4779.2069

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد و شاخص‌های تحمل به تنش خشکی اکوتیپ‌های جغجغک (*Vaccaria hispanica* (Mill.) Rauschert)

نسیم صولت‌پتلو[۱]، رسول اصغری‌زکریا[۲*]، اصغر عبادی[۳]، پرویز شریفی‌زیوه[۴]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۲. استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۳. دانشیار، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۴. استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مغان، اردبیل

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
جغجغک
رژیم آبیاری
شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG)
شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۰۹/۰۶

تاریخ انتشار:
تابستان ۱۴۰۲

۱۶(۲): ۵۱۷-۵۳۰

چکیده

جغجغک (*Vaccaria hispanica* (Mill.) Rauschert)، گیاهی یک‌ساله از تیره میخکیان است که به دلیل داشتن تری‌ترپنوئیدهای ساپونینی پتانسیل زیادی برای تولید محصولات دارویی دارد. این آزمایش به‌منظور ارزیابی تحمل به تنش خشکی اکوتیپ‌های جغجغک به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام پذیرفت. کرت‌های اصلی شامل سه تیمار عدم تنش، تنش ملایم و تنش شدید (به ترتیب دور آبیاری ۷، ۱۰ و ۱۴ روز) بود و کرت‌های فرعی به هشت اکوتیپ جغجغک بومی شمال غرب کشور اختصاص داده شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر رژیم آبیاری، اکوتیپ و اثر متقابل آن‌ها بر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و شاخص‌های تحمل معنی‌دار بود. ازنظر شاخص پایداری عملکرد، شاخص تحمل به خشکی، میانگین هارمونیک، میانگین هندسی و میانگین بهره‌وری عملکرد، کمترین مقدار در تنش ملایم و شدید به ترتیب به اکوتیپ‌های ۷ و ۱ مربوط شد و بیشترین مقدار این شاخص‌ها در هر دو شرایط به اکوتیپ ۶ مربوط شد. برآورد شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) و شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI) برای اکوتیپ‌های مختلف بر اساس کلیه شاخص‌های تحمل نشان داد که اکوتیپ ۶ با داشتن بیشترین مقدار SIIG و کمترین مقدار MGIDI در هر دو شرایط تنش، متحمل‌ترین اکوتیپ بود و اکوتیپ‌های ۴ و ۳ در تنش ملایم و اکوتیپ ۳ در تنش شدید در رتبه بعدی قرار داشتند. در شرایط تنش ملایم اکوتیپ‌های ۷ و ۸ و در شرایط تنش شدید اکوتیپ‌های ۱ و ۷ با داشتن کمترین مقدار SIIG و بیشترین مقدار MGIDI حساسیت بالایی به تنش خشکی نشان دادند.

مقدمه

جغجغک (*Vaccaria hispanica* (Mill.) Rauschert) با تعداد کروموزوم دیپلوئیدی (۲n=۲x=۳۰)، گیاهی یک‌ساله از تیره میخکیان[۱] است که به دلیل داشتن تری‌ترپنوئیدهای ساپونینی به‌عنوان یک گیاه دارویی شناخته می‌شود و در مناطق آسیای مرکزی و شرقی، آمریکای جنوبی، آمریکای شمالی و استرالیا پراکنده است. خانواده‌ی میخکیان شامل ۱۰۴ جنس با بیش از ۲۰۰۰ گونه است. ویژگی غیرمعمول این خانواده، تولید کف پایدار و بادوام است که وقتی قسمت‌هایی از گیاهان در آب قرار می‌گیرند، ظاهر می‌شود. این رفتار به دلیل تولید ساپونین‌ها در این گیاهان است.

[1] Caryophyllaceae

* نگارنده پاسخگو: رسول اصغری‌زکریا. پست الکترونیک: r-asghari@uma.ac.ir

اجزای زیست فعال دانه‌های جغجغک شامل فنول‌ها (Guclu-Ustundag and Mazza, 2009)، پپتیدهای حلقوی (Wanga et al., 2011) و ساپونین‌ها (Sang et al., 2000) هستند. دانه‌های واکاریا منبع اصلی ساپونین‌ها هستند که برای درمان سرطان‌ها و عفونت‌های مختلف مورداستفاده قرار می‌گیرند (Kumar et al., 2011; Shrestha and Baik, 2010). ساپونین‌ها از مواد گیاهی هستند که به‌طور مطلوبی خطر سرطان را کاهش می‌دهند. گزارش شده است که ساپونین‌ها دارای خواص کاهش‌دهنده کلسترول، تحریک‌کننده سیستم ایمنی بدن و ضد سرطان هستند (Rao and Koratkar, 1997). مطالعات درون شیشه‌ای (برون تنی) و درون تنی خواص ضد سرطانی ساپونین‌های گیاهان دارویی را تأیید کرده‌اند. سازوکارهای پیشنهادی برای خاصیت ضد سرطانی ساپونین‌ها شامل اثرات آنتی‌اکسیدانی، سمیت سلولی مستقیم و انتخابی بر سلول‌های سرطانی، تحریک سیستم ایمنی و تنظیم تکثیر سلولی است (Balsevich, 2008; Shrestha and Baik, 2010; Efthimiadou et al., 2012). با توجه به این‌که جغجغک به دلیل داشتن انواع ساپونین‌های ترپنوئیدی، گیاه دارویی و صنعتی مهمی با خواص درمانی فراوان است (Efthimiadou et al., 2012) و دارای طیف گسترده‌ای از کاربردهای دارویی مانند ضد پلاکت، ضد کلسترول بالا، ضد توموری، ضد HIV، تقویت‌کننده سیستم ایمنی، ضدالتهاب، ضد باکتری، حشره‌کش و قارچ‌کش است (Yendo et al., 2010; Tian et al., 2021)، کشت و کار و زراعت آن در برخی از کشورها ازجمله کانادا رونق دارد (Balsevich, 2008). بررسی اهلی کردن جغجغک نشان داد که جمعیت‌های این گیاه برای کشت و کار در کشاورزی سازگاری کافی دارند (Duddu and Shirtliffe, 2010).

تنش خشکی باعث صدمه به گیاه می‌شود که ممکن است نمودهای ظاهری همچون کاهش رشد، مرگ بخشی از گیاه و یا مرگ کل گیاه داشته باشد (Khadem et al., 2007). ازاین‌رو اصلاح گیاهان برای افزایش تحمل و مقاومت آن‌ها به تنش و افزایش عملکرد آن‌ها در شرایط خشکی انجام می‌شود (Eskandari et al., 2010; Akhondi et al., 2006; Salek Mearaji and Tavakoli, 2020). به دنبال وقوع تنش آبی به دلیل کاهش فتوسنتز، عملکرد و ماده خشک گیاه کاهش می‌یابد (Rezvani Moghadam et al., 2005; Farzadi et al., 2019). اعمال رژیم‌های مختلف آبیاری تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌ی فرعی، تعداد کپسول، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، عملکرد روغن و شاخص برداشت گیاهان می‌گذارد. در کنجد گزارش شده است که تیمارهای مختلف آبیاری هرچند بر تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه تأثیری نداشت ولی بر ارتفاع بوته و تعداد کپسول در بوته اثر معنی‌دار داشت و خشکی منجر به توقف رشد، کاهش ماده‌ی خشک، تعداد برگ در گیاه و عملکرد دانه شد (Mensah et al., 2006, Jain et al., 2010). افزایش دفعات آبیاری به‌طور معنی‌داری تعداد شاخه-های فرعی، تعداد دانه در کپسول، زیست‌توده در واحد سطح و شاخص برداشت را در گیاهان مختلف افزایش داد (Sinaki et al., 2007; Omidi et al., 2009; Kamkar et al., 2011; Golestani, 2021). مطالعات کمی در مورد زراعت و بهبود ژنتیکی جغجغک در ایران انجام‌شده است. بنابراین، با توجه به امکان اهلی‌سازی و کشت و کار این گیاه و اهمیت دارویی و صنعتی آن (Efthimiadou et al., 2012) هدف از این آزمایش بررسی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک اکوتیپ‌های مختلف جغجغک تحت رژیم‌های مختلف آبیاری و ارزیابی تحمل آن‌ها در برابر تنش خشکی با استفاده از شاخص‌های مختلف تحمل به تنش خشکی بود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال ۱۳۹۹ در پارس‌آباد مغان به مختصات ۳۹ درجه‌ی شمالی و ۴۷ درجه‌ی شرقی و ارتفاع ۳۲ متر از سطح دریا انجام پذیرفت. میانگین بارندگی و دمای سالیانه‌ی این محل به ترتیب ۲۷۱ میلی‌متر و ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه در جدول ۱ آمده است. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. کرت‌های اصلی به سه تیمار عدم تنش، تنش ملایم و تنش شدید و کرت‌های فرعی به هشت اکوتیپ بومی جغجغک که از مناطق مختلف شمال غرب کشور جمع‌آوری شده بودند (جدول ۲)، اختصاص داده شد. هر کرت آزمایشی فرعی شامل ۵ ردیف کشت به طول ۲/۵ متر با فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متر از هم بود. فاصله‌ی دو بوته روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر، عمق کشت حدود ۲ سانتی‌متر و فاصله‌ی کرت‌های اصلی از هم برای حصول اطمینان از عدم نفوذ رطوبت کرت‌های مجاور ۱/۵ تا ۲ متر در نظر گرفته شد. کشت در تاریخ ۲۹ فروردین‌ماه ۱۳۹۹ در مزرعه انجام شد، به‌طور هم‌زمان در هشت سینی نشاء، بذور هر اکوتیپ کشت شد و برای حفظ تراکم بوته‌ها در هر کرت،

به‌جاهایی که بذر سبز نشده بود، ۱۵ روز بعد از تاریخ کشت منتقل شدند. مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت وجین دستی انجام پذیرفت. با توجه به اعمال تنش خشکی آخر فصل در این آزمایش، آبیاری برای تمام واحدهای آزمایشی تا مرحله ساقه‌روی به‌طور مشابه انجام پذیرفت و پس‌ازآن برای اعمال تنش، فواصل آبیاری (۷، ۱۰ و ۱۴ روز به ترتیب برای تیمار نرمال، تنش متوسط و تنش شدید) برای کرت‌های مدنظر افزایش یافت. به‌طوری‌که بعد از شروع تیمار خشکی، در تیمار نرمال، تنش متوسط و تنش شدید به ترتیب ۴، ۳ و ۲ بار تا زمان برداشت آبیاری انجام گرفت.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1. Physicochemical properties of experimental field

بافت	درصد اشباع					کربن آلی	شن	سیلت	رس	مشخصه
Texture	SP	K	P	N	pH	Organic Carbon	Sand	Silt	Clay	Characteristic
		------- mg.kg^{-1} -------				%	----------%----------			
Silty loam	49	200	24	0.7	7.5	0.59	34	44	22	میزان value

جدول ۲. مختصات جغرافیایی محل جمع‌آوری بذور اکوتیپ‌های جغجغک

Table 2. Geographical coordination of collection sites of cow cockle ecotypes

اکوتیپ	محل جمع‌آوری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
Ecotype	Collection sites	Longitude	Latitude	Altitude
		(°)	(°)	(m)
1	مشکین‌شهر	38.5285	47.8424	1126
2	ماکو	39.3373	44.1675	1921
3	تسوج	38.3296	45.279	1384
4	جلفا	38.8455	45.2272	945
5	هوراند	38.5825	47.2234	1776
6	شبستر	38.19035	45.8531	1372
7	سراب	37.9568	47.040	1662
8	ارومیه	37.5397	45.2139	2139

صفات عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک در واحد کرت ثبت و شاخص برداشت و شاخص‌های تحمل محاسبه شد. شاخص‌های کمی تحمل و حساسیت به تنش، با استفاده از میانگین عملکرد هر اکوتیپ در شرایط بدون تنش (Yp) و شرایط تنش (Ys) از روابط زیر محاسبه گردید:

شاخص تحمل (Rossielle and Hamblin, 1981):

$$TOL = Yp - Ys \quad [۱]$$

شاخص متوسط بهره‌وری (Hossain et al., 1990):

$$Mp = (Yp + Ys)/2 \quad [۲]$$

شاخص تحمل به تنش (Fernandez, 1992):

$$STI = (Yp)(Ys)/(\bar{Y}_p)^2 \quad [۳]$$

شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (Hossain et al., 1990):

$$GMP = \sqrt{(Yp \times Ys)} \quad [۴]$$

شاخص میانگین هارمونیک (Hossain et al., 1990):

$$HM = 2(Yp \times Ys)/(Yp+Ys) \quad [۵]$$

شاخص حساسیت به تنش (Fischer and Maurer, 1978):

$$SSI = (1-(Ys/Yp))/SI \quad [۶]$$

شدت تنش خشکی (Fischer and Maurer, 1978):

$$SI = 1- (\bar{Y}_s / \bar{Y}_p) \quad [۷]$$

شاخص عملکرد (Gavuzzi et al., 1997):

$$YI = Ys / \bar{Y}_s \quad [۸]$$

شاخص پایداری عملکرد (Bouslama, and Chapaugh, 1984):

$$YSI = Ys / Yp \quad [۹]$$

درصد کاهش عملکرد:

$$YRP = \frac{(Yp - Y_s)}{Y_p} \times 100 \quad [۱۰]$$

در روابط فوق، $\overline{Y}_p$ و $\overline{Y}_s$ به ترتیب میانگین عملکرد تمامی اکوتیپ‌ها در محیط بدون تنش و تنش است.

به‌منظور بررسی بهتر و کارآمدتر تحمل خشکی اکوتیپ‌ها با استفاده از تمام شاخص‌های تحمل، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت آن‌ها، شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG)[۲] و شاخص فاصله چند متغیره ژنوتیپ از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI)[۳] محاسبه شد.

شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG)

ابتدا داده‌های اصلی از طریق رابطه ۱۱ نرمال‌سازی شدند.

$$r_{ij}=\frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum X_{ij}^2}} \qquad [۱۱]$$

سپس برای هر صفت یا شاخص بهترین اکوتیپ به‌عنوان ژنوتیپ ایده‌آل و ضعیف‌ترین اکوتیپ به‌عنوان ژنوتیپ غیر ایده‌آل تعیین و انتخاب شدند. در گام بعدی فاصله هر اکوتیپ از ژنوتیپ‌های ایده‌آل (d_i^+) و ضعیف (d_i^-) طبق روابط زیر محاسبه شدند.

$$d_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{g}(r_{ij}-r_i^+)^2} \qquad [۱۲]$$

$$d_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{g}(r_{ij}-r_i^-)^2} \qquad [۱۳]$$

که در آن r_{ij} مقدار نرمال شده شاخص (صفت) iام برای ژنوتیپ jام (i= 1, 2, …, n و j=1, 2, …, g) و r_i^+ و r_i^- به ترتیب مقدار نرمال شده ژنوتیپ‌های ایده‌آل و ضعیف برای شاخص (صفت) iام است. درنهایت مقدار شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) برای هر اکوتیپ طبق رابطه ۱۴ محاسبه شد.

$$SIIG=\frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \qquad [۱۴]$$

شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI):

برای محاسبه شاخص MGIDI ابتدا ماتریس X تغییر مقیاس داده شد به‌طوری‌که همه مقادیر دارای محدوده ۱۰۰-۰ شدند (Olivoto et al., 2019). مقادیر تغییر مقیاس برای صفت jام از ژنوتیپ iام (rX_{ij}) از طریق معادله (۱۵) به دست آمد:

$$rX_{ij}=\frac{\eta_{nj}-\varphi_{nj}}{\eta_{oj}-\varphi_{oj}}\times\left(\theta_{ij}-\eta_{oj}\right)+\eta_{nj} \qquad [۱۵]$$

که در آن η_{nj} و φ_{nj} به ترتیب حداکثر (۱۰۰) و حداقل (صفر) مقادیر جدید برای صفت j پس از تغییر مقیاس هستند. η_{oj} و φ_{oj} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر صفت j هستند و θ_{ij} مقدار اصلی صفت jام در ژنوتیپ iام است. مقادیر η_{nj} و φ_{nj} به شرح زیر انتخاب شدند. برای صفاتی که مقادیر کمتر آن‌ها مدنظر است (TOL، SSI و RP%)، از $\varphi nj = 100$ و $\eta nj = 0$ و برای صفاتی که مقادیر بالاتر آن‌ها موردنظر است (Yp، Ys، HI، BM و شاخص‌های تحمل دیگر)، از $\eta nj = 100$ و $\varphi nj = 0$ استفاده شد. پس از تغییر مقیاس، یک جدول دوطرفه از مقادیر جدید (rX_{ij}) به دست آمد. هر عضو از rX دارای محدوده ۱۰۰-۰ است و ساختار همبستگی مجموعه اصلی متغیرها را حفظ می‌کند. مرحله دوم تجزیه‌وتحلیل عاملی برای گروه‌بندی صفات مرتبط با هر عامل و سپس برآورد نمرات هر ژنوتیپ برای این فاکتورها است. مقادیر ویژه و بردارهای ویژه از ماتریس همبستگی ماتریس دوطرفه rX_{ij} به دست آمد. نمرات عاملی تنها با در نظر گرفتن عواملی با مقادیر ویژه بالاتر از یک به دست آمد. چرخش واریماکس (Kaiser, 1958) برای چرخش و برآورد ضرایب نهایی استفاده شد. سپس نمرات ژنوتیپ‌ها به همراه ژنوتیپ ایده‌آل برای هر عامل به دست آمد. طبق تعریف (رابطه ۱۱)، ژنوتیپ ایده‌آل دارای بیشترین مقدار مقیاس جدید (۱۰۰) برای همه صفات مورد تجزیه‌وتحلیل است. در مرحله آخر شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI) طبق رابطه (۱۶) محاسبه شد:

$$MGIDI_i=\sqrt{\sum_{j=1}^{f}(\gamma_{ij}-\gamma_j)^2} \qquad [۱۶]$$

که در آن MGIDIi شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل برای ژنوتیپ iام، γ_{ij} نمره ژنوتیپ iام در فاکتور jام (i= 1, 2, …, g و j=1, 2, …, f) است که g تعداد ژنوتیپ‌ها، f تعداد فاکتورها و γ_j نمره ژنوتیپ ایده‌آل در فاکتور jام است. بر این اساس، ژنوتیپ با کمترین MGIDI به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است و با محاسبه آن تمام صفات مورد تجزیه‌وتحلیل می‌گیرد. همچنین سهم هر فاکتور در شاخص MGIDI ژنوتیپ iام که با (ω_{ij}) نشان داده می‌شود، طبق فرمول (۱۷) محاسبه شد:

$$w_{ij}=\frac{\sqrt{D_{ij}^2}}{\sum_{j=1}^{f}\sqrt{D_{ij}^2}} \qquad [۱۷]$$

که در آن D_{ij} فاصله بین ژنوتیپ iام و ایده‌آل برای فاکتور jام است. برای یک ژنوتیپ معین، عواملی با سهم کمتر نشان

[2] Selection index of ideal genotype

[3] The multi-trait genotype–ideotype distance index (MGIDI)

می‌دهد که این ژنوتیپ ازلحاظ صفات مهم درون آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک است.

تجزیه‌ی واریانس داده‌ها بر اساس کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو محیط تنشی انجام و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) و تجزیه عاملی بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و چرخش واریماکس به کمک نرم‌افزار SPSS و محاسبه شاخص‌های تحمل، SIIG و MGIDI با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر سطوح آبیاری، اکوتیپ و اثر متقابل اکوتیپ در تنش خشکی ازلحاظ عملکرد دانه در هکتار، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و بیشتر شاخص‌های تحمل معنی‌دار است (جدول ۳). اکوتیپ‌های ۵، ۶، ۸، ۳ و ۴ بدون اختلاف معنی‌دار با یکدیگر در شرایط آبیاری نرمال بیشترین عملکرد دانه در هکتار را داشتند ولی غیر از اکوتیپ‌های ۶ و ۳، بقیه بیشترین افت عملکرد را به همراه اکوتیپ ۷ تحت تنش خشکی متوسط (دور آبیاری ۱۰ روز) نشان دادند. در تنش شدید خشکی (دور آبیاری ۱۴ روز)، اکوتیپ ۶ با اختلاف معنی‌دار بیشترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. در این شرایط اکوتیپ‌های ۵ و ۸ با اختلاف معنی‌دار نسبت به اکوتیپ‌های دیگر بیشترین کاهش عملکرد را به خود اختصاص دادند. همچنین خشکی باعث کاهش عملکرد دانه و بیولوژیک در اکوتیپ‌های جغجغک شد. هرچند در شرایط تنش متوسط اکوتیپ‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ بدون اختلاف معنی‌دار با یکدیگر بیشترین عملکرد بیولوژیک در هکتار را داشتند ولی در شرایط تنش شدید اکوتیپ ۶، بیشترین عملکرد بیولوژیک را با اختلاف معنی‌دار نسبت به اکوتیپ‌های دیگر نشان داد.

ازلحاظ شاخص برداشت در شرایط تنش ملایم (آبیاری از هر ۱۰ روز) غیر از اکوتیپ ۷، اکوتیپ‌های دیگر اختلاف معنی‌داری بین هم نشان ندادند؛ اما در تنش شدید (آبیاری از هر ۱۴ روز) اکوتیپ ۱ کمترین مقدار این شاخص را داشت. همچنین شاخص برداشت اکوتیپ‌ها در تنش شدید نسبت به تنش متوسط کاهش یافت. این کاهش را می‌توان به کاهش بیشتر عملکرد دانه نسبت به عملکرد بیولوژیک در شرایط تنش شدید نسبت داد. کمیت و کیفیت رشد گیاهان به رطوبت وابسته است و میزان کاهش رشد به‌شدت و مدت تنش وابسته بوده و کاهش عملکرد به علت تنش خشکی در مرحله‌ی زایشی بیشتر است (Taiz and Zeiger, 2006; Sinaki et al., 2007). بررسی عملکرد و برخی صفات زراعی دو رقم گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری نشان داد که تنش خشکی عملکرد دانه و عملکرد روغن را به ترتیب به میزان ۵۱ و ۶۵ درصد کاهش داد (Salek Mearaji and Tavakoli, 2020). گزارش شده است که تنش کم‌آبی با ایجاد پیری زودرس اندام‌های فتوسنتز کننده و کاهش فتوسنتز جاری گیاه موجب کاهش عملکرد دانه در واحد سطح می‌شود (Emam et al., 2006).

شاخص‌های تحمل خشکی

شاخص‌های مختلف تحمّل به خشکی برای هشت اکوتیپ جغجغک موردمطالعه محاسبه شدند (جدول ۳). در این تحقیق شدّت تنش (SI) در شرایط تنش ملایم ۰/۳۳ و در شرایط تنش شدید ۰/۶۹ برآورد شد. بیشترین مقدار شاخص تحمل (TOL) در تنش ملایم به اکوتیپ‌های ۵، ۷ و ۸ و در تنش شدید به اکوتیپ‌های ۴، ۵ و ۸ تعلق داشت. ازلحاظ شاخص حساسیت به خشکی (SSI) بیشترین مقدار در تنش ملایم مربوط به اکوتیپ‌های ۷ و ۸ و در تنش شدید غیر از اکوتیپ ۶، بقیه بیشترین مقدار این شاخص را داشتند (جدول ۳). اکوتیپ‌هایی با بیشترین مقدار برای این دو شاخص، حساسیت و کاهش عملکرد بیشتری در مواجهه با تنش دارند (Rosielle anf Hamblin, 1981; Fisher and Maurer, 1978). همچنین طبق جدول (۳) بیشترین درصد کاهش عملکرد (YRP) در تنش ملایم مربوط به اکوتیپ‌های ۲، ۷ و ۸ و در تنش شدید غیر از اکوتیپ‌های ۶ و ۲، بقیه بیشترین مقدار این شاخص را داشتند (جدول ۳). در تنش ملایم اکوتیپ‌های ۶ و ۵ و در تنش شدید اکوتیپ ۶ به‌تنهایی بیشترین مقدار شاخص STI به خود اختصاص دادند.

در تنش ملایم بیشترین مقادیر میانگین هندسی عملکرد (GMP)، میانگین هارمونیک عملکرد (HM) و شاخص عملکرد (YI) به اکوتیپ‌های ۶، ۵ و ۴ و در تنش شدید به اکوتیپ ۶ اختصاص داشت. همچنین، اکوتیپ ۶ بیشترین عملکرد را در شرایط تنش ملایم و شدید نشان داد. در خصوص شاخص پایداری عملکرد (YSI) در حالت تنش ملایم کمترین مقدار به اکوتیپ‌های ۸ و ۷ و بیشترین آن به اکوتیپ‌های ۱، ۳، ۴ و ۶ مربوط بود؛ در شرایط تنش شدید

نیز کمترین مقدار به اکوتیپ‌های ۱ و ۵ و بیشترین آن به اکوتیپ ۶ و ۳ اختصاص داشت (جدول ۳). ازآنجاکه این شاخص حاصل تقسیم عملکرد اکوتیپ در شرایط تنش بر میانگین عملکرد کلیه اکوتیپ‌های موردمطالعه است، می‌توان آن را معیاری برای گزینش اکوتیپ‌ها برحسب مقدار عملکرد تولیدی آن‌ها در شرایط تنش عنوان کرد (Sio-Se Marde et al., 2006). بررسی رابطه بین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش کم‌آبی با شاخص‌های تحمل به خشکی نشان داده است که شاخص‌های STI، MP و GMP از کارایی بالایی برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کم‌آبی در گندم برخوردارند (Farzadi et al., 2019).

شاخص گزینش SIIG

به‌منظور ارزیابی تحمل اکوتیپ‌های مختلف جغجغک با استفاده از همه شاخص‌های تحمل، عملکرد دانه و بیولوژیک و نیز شاخص برداشت به‌طور هم‌زمان، از شاخص‌های SIIG و MGIDI استفاده شد. درواقع این شاخص‌ها نتایج حاصل از بررسی همه صفات و شاخص‌ها را با هم در نظر گرفته و تبدیل به یک شاخص واحد می‌کنند. با این کار انتخاب اکوتیپ‌های متحمل راحت‌تر و کارایی آن بیشتر می‌شود (Zali et al., 2015; Olivoto and Nardino, 2020). در مورد SIIG با توجه به این‌که مقدار آن بین صفر و یک است هر چه مقدار این شاخص برای ژنوتیپی به یک نزدیک باشد، به این معنی است که فاصله آن از ژنوتیپ ایده‌آل منفی (ژنوتیپ حساس) بیشتر بوده و آن ژنوتیپ از تحمل تنش بالایی برخوردار است. از سوی دیگر هرچه مقدار SIIG برای ژنوتیپی نزدیک به صفر باشد به این معنی است که فاصله آن از ژنوتیپ ایده‌آل منفی (ژنوتیپ حساس) کمتر بوده و درنتیجه از تحمل تنش پایین‌تری برخوردار است (Zali et al., 2015). بر این اساس، برآورد شاخص SIIG برای اکوتیپ‌های مختلف (جدول ۴) نشان داد که اکوتیپ ۶ دارای بیش‌ترین مقدار SIIG در هر دو شرایط تنش ملایم و شدید بود. اکوتیپ‌های ۴ و ۳ به ترتیب با داشتن مقدار SIIG برابر با ۰/۷۴۲ و ۰/۶۹۶ در تنش ملایم در رتبه بعدی قرار داشتند و جزو اکوتیپ‌های با تحمل تنش خشکی نسبتاً بالا در این شرایط دسته‌بندی شدند. در شرایط تنش شدید نیز بعد از اکوتیپ ۶، اکوتیپ ۳ با داشتن مقدار SIIG برابر با ۰/۶۱۶ از تحمل تنش خشکی نسبتاً بالایی برخوردار بود. در شرایط

جدول ۳. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین شاخص‌های تحمل خشکی اکوتیپ‌های مختلف جغجغک در شرایط تنش خشکی متوسط و شدید

Table 3. Analysis of variance and means comparison of drought tolerance indices of different cow cockle ecotypes under moderate and severe drought stress conditions

Environment	محیط	اکوتیپ Ecotype	YP	YS	TOL	MP	GMP	HM	SI
تنش متوسط Moderate stress		1	2580.0^{bc}	1887.0^{bc}	693.0^{c}	2233.5^{bc}	2206.4^{cd}	2177.7^{cd}	0.33
		2	2403.0^{c}	1564.0^{cd}	839.0^{bc}	1983.5^{c}	1938.6^{de}	1884.7^{de}	0.33
		3	2696.0^{bc}	1986.7^{ab}	709.3^{c}	2341.3^{b}	2214.2^{bc}	2282.3^{bc}	0.33
		4	2952.6^{ab}	2069.0^{ab}	883.6^{bc}	2510.8^{ab}	2471.6^{abc}	2420.1^{ab}	0.33
		5	3315.0^{a}	2055.0^{ab}	1260.0^{ab}	2685.0^{a}	2610.0^{ab}	2537.1^{ab}	0.33
		6	3170.0^{a}	2325.0^{a}	845.0^{bc}	2747.5^{a}	2714.8^{a}	2682.5^{a}	0.33
		7	2559.0^{bc}	1341.0^{d}	1218.0^{ab}	1950.0^{c}	1852.4^{e}	1759.8^{e}	0.33
		8	3216.0^{a}	1733.0^{bc}	1483.0^{a}	2474.5^{ab}	2360.7^{bc}	2252.3^{bc}	0.33
تنش شدید Severe stress		1	2580.0^{bc}	590.0 ^{d}	1989.4^{bcd}	1585.0^{d}	1233.7^{d}	960.3^{d}	0.69
		2	2403.0^{c}	864.0 ^{bc}	1538.9^{d}	1633.5^{cd}	1440.9^{bcd}	1266.6^{bc}	0.69
		3	2696.0^{bc}	1029.0 ^{b}	1667.6^{cd}	1862.5^{bc}	1665.5^{b}	1476.6^{b}	0.69
		4	2952.6^{ab}	831.0 ^{bc}	2121.1^{abc}	1891.8^{b}	1566.4^{bc}	1276.3^{bc}	0.69
		5	3315.0^{a}	777.0 ^{cd}	2538.0^{a}	2046.0^{ab}	1604.9^{b}	1252.7^{bc}	0.69
		6	3170.0^{a}	1280.0^{a}	1890.0^{bcd}	2225.0^{a}	2014.3^{a}	1822.6^{a}	0.69
		7	2559.0^{bc}	659.6^{cd}	1899.4^{bcd}	1609.8^{d}	1299.1^{cd}	1047.8^{cd}	0.69
		8	3216.0^{a}	851.0^{bc}	2365.1^{ab}	2035.5^{ab}	1654.3^{b}	1336.8^{b}	0.69
Drought stress (D)	تنش خشکی	$F_{5\%(1, 4)}$	ns	**	**	**	**	**	-
Ecotype (E)	اکوتیپ	$F_{5\%(7, 28)}$	**	**	**	**	**	**	-
D×E	D×E	$F_{5\%(7, 28)}$	ns	*	ns	ns	ns	*	-
CV (%)	ضریب تغییرات		*8.44*	*12.58*	*18.48*	*7.45*	*8.28*	*9.71*	-

Table 3. Continued **جدول ۳. ادامه**

Environment	محیط	اکوتیپ Ecotype	SSI	STI	YRP	YI	YSI	BM	HI
تنش متوسط Moderate stress		1	0.77^{d}	0.59 ^{d}	26.86^{b}	1.01^{bc}	0.73^{a}	5639.7^{b}	33.8^{a}
		2	1.00^{cd}	0.45^{e}	34.91^{ab}	0.83^{cd}	0.65^{ab}	5370.2^{b}	28.8^{ab}
		3	0.75^{d}	0.65^{cd}	26.31^{b}	1.06^{ab}	0.74^{a}	7192.3^{a}	27.6^{ab}
		4	0.86^{cd}	0.74^{bc}	29.93^{b}	1.10^{ab}	0.70^{a}	6897.9^{a}	29.8^{ab}
		5	1.09^{bc}	0.83^{ab}	38.01^{ab}	1.09^{ab}	0.62^{ab}	7036.1^{a}	29.1^{ab}
		6	0.76^{d}	0.90^{a}	26.66^{b}	1.25^{a}	0.73^{a}	6941.3^{a}	33.4^{a}
		7	1.37^{a}	0.41^{e}	48.60^{a}	0.71^{d}	0.52^{b}	5315.7^{b}	24.7^{b}
		8	1.33^{ab}	0.68^{cd}	46.11^{a}	0.92^{bc}	0.53^{b}	6043.6^{b}	28.6^{ab}
تنش شدید Severe stress		1	1.1^{a}	0.18^{c}	77.13^{a}	0.68^{c}	0.22^{d}	3381.0^{bc}	17.0^{b}
		2	0.9^{ab}	0.25^{bc}	64.04^{bcd}	1.00^{bc}	0.35^{ab}	3647.7^{bc}	23.4^{ab}
		3	0.88^{ab}	0.33^{b}	61.83^{cd}	1.19^{b}	0.38^{ab}	4150.1^{b}	24.4^{ab}
		4	1.02^{a}	0.29^{bc}	71.86^{abc}	0.96^{bc}	0.28^{bcd}	4066.5^{b}	20.6^{ab}
		5	1.09^{a}	0.31^{bc}	76.56^{a}	0.90^{bc}	0.23^{d}	3411.4^{bc}	22.39^{ab}
		6	0.85^{b}	0.49^{a}	59.62^{d}	1.48^{a}	0.41^{a}	4892.7^{a}	26.19^{a}
		7	1.06^{a}	0.21^{c}	74.22^{ab}	0.76^{c}	0.26^{cd}	3190.3^{c}	20.71^{ab}
		8	1.05^{a}	0.33^{b}	73.54^{ab}	0.98^{bc}	0.26^{cd}	3607.8^{bc}	23.43^{ab}
Drought stress (D)	تنش خشکی	$F_{5\%(1, 4)}$	ns	**	**	ns	**	**	**
Ecotype (E)	اکوتیپ	$F_{5\%(7, 28)}$	**	**	**	**	**	**	**
D × E	D × E	$F_{5\%(7, 28)}$	*	*	ns	*	*	*	*
CV (%)	ضریب تغییرات		*17.20*	*16.63*	*13.25*	*15.39*	*14.42*	*8.41*	*12.21*

میانگین عملکرد (kg ha^{-1}) هر اکوتیپ در شرایط بدون تنش (Yp)، عملکرد (kg ha^{-1}) هر اکوتیپ در شرایط تنش (Ys)، شاخص تحمل (TOL)، شاخص متوسط بهره‌وری (MP)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین هارمونیک (HM)، شدت تنش خشکی (SI)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص تحمل تنش (STI)، درصد کاهش عملکرد (YRP)، شاخص عملکرد (YI)، پایداری عملکرد (YSI)، بیوماس کل (BM) و شاخص برداشت (HI).

Mean yield (kg ha^{-1}) of each ecotype in non-stress conditions (Yp), mean yield (kg ha^{-1}) of each ecotype under stress conditions (Ys), tolerance index (TOL), mean productivity (MP), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), drought stress intensity (SI), stress sensitivity index (SSI), stress tolerance index (STI), yield reduction percentage (YRP), yield index (YI), yield stability (YSI), total biomass (BM), and harvest index (HI).

تنش ملایم اکوتیپ‌های ۷ و ۸ با داشتن کمترین مقدار SIIG حساسیت بالایی به تنش خشکی نشان دادند. در شرایط تنش شدید نیز اکوتیپ‌های ۱ و ۷ با داشتن کمترین مقدار SIIG حساسیت بسیار بالایی به تنش خشکی داشتند. در این شرایط غیر از اکوتیپ ۶ و تا حدی اکوتیپ ۳ بقیه اکوتیپ‌ها تحمل بالایی در برابر تنش خشکی نداشتند و این را می‌توان به‌راحتی از مقادیر کمتر از ۰/۵ SIIG آن‌ها استنباط کرد (جدول ۴).

استفاده از شاخص SIIG برای گزینش ژنوتیپ‌های برتر در تعدادی از مطالعات گزارش‌شده است. به‌طور مثال، از شاخص SIIG برای ادغام آماره‌های مختلف پایداری در گندم دوروم (Najafi Mirak et al., 2018) و کلزا (Zali et al., 2015) برای معرفی ارقام پایدار استفاده شد. همچنین استفاده از این شاخص برای معرفی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در گندم نان (Yaghutipoor et al., 2017) و کلزا (Zali et al., 2016)، معرفی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آلومینیوم در گندم دوروم (Ramzi et al., 2018) و تعیین ژنوتیپ‌های متحمل به تنش یخزدگی در کلزا (Abdollahi et al., 2021) گزارش‌شده است. این محققان گزارش کردند که استفاده از این شاخص، انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار و نیز متحمل به تنش را با ادغام شاخص‌ها و آماره‌های مختلف راحت‌تر و کارآمدتر می‌کند.

شاخص MGIDI

شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI) با در نظر گرفتن همه شاخص‌های مورداستفاده محاسبه شد (جدول ۴). تجزیه عاملی بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که دو عامل اول با مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک، در دو شرایط تنش ملایم و شدید به ترتیب با ۹۵/۵۸ درصد و ۹۷/۱۸ درصد از تغییرات کل بین شاخص‌های موردمطالعه را توجیه می‌کنند (جدول ۵). در شرایط تنش

ملایم، عامل اول ۵۵/۵۷ درصد از تغییرات بین متغیرها را توجیه کرد. بزرگ‌ترین ضرایب عاملی مثبت پس از چرخش واریماکس در این عامل مربوط به عملکرد بیولوژیک، Yp، Ys، MP، STI، GMP، HM و YI بود. عامل دوم هم ۳۹/۰۱ درصد از واریانس کل را توجیه نمود که در این عامل هم شاخص‌های TOL، SSI، YSI، YRP و شاخص برداشت دارای ضرایب عاملی مثبت و بالایی بودند. در شرایط تنش شدید، عامل اول ۶۷/۵۱ درصد از واریانس کل بین متغیرها را توجیه کرد که بزرگ‌ترین ضرایب عاملی مثبت در آن مربوط به عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، Ys،Yp، GMP،STI، HM، SSI، YSI، YRP و YI بود. عامل دوم هم ۲۹/۶۷ درصد از تغییرات کل را توجیه نمود که در این عامل هم شاخص‌های YP، MP با ضریب مثبت و TOL با ضریب منفی دارای ضرایب عاملی بالایی بودند.

بر اساس شاخص MGIDI هر چه اکوتیپ موردنظر مقدار MGIDI کمتری داشته باشد نشان می‌دهد که این اکوتیپ فاصله کمتری از ژنوتیپ ایده‌آل داشته و قرابت بیشتری با ژنوتیپ مطلوب دارد. برعکس، هرچه مقدار MGIDI برای اکوتیپی بیشتر باشد، به این معنی است که فاصله آن از ژنوتیپ ایده‌آل (متحمل) بیشتر بوده و حساسیت بیشتری به شرایط تنش دارد (Olivoto and Nardino, 2020).

جدول ۴. برآورد شاخص SIIG و MGIDI برای اکوتیپ‌های مختلف

Table 4. Estimation of SIIG and MGIDI index for different ecotypes

	اکوتیپ Ecotype	di^-	di^+	SIIG	رتبه rank	MGIDI	رتبه rank	ω_{i1}	ω_{i2}
تنش ملایم Moderate stress	1	0.471	0.269	0.637	4	1.877	5	0.867	0.133
	2	0.304	0.425	0.417	6	2.633	7	0.822	0.178
	3	0.496	0.216	0.696	3	1.354	3	0.978	0.022
	4	0.471	0.164	0.742	2	0.890	2	0.645	0.355
	5	0.416	0.282	0.596	5	1.563	4	0.057	0.943
	6	0.598	0.057	0.912	1	0.134	1	0.295	0.705
	7	0.093	0.591	0.136	8	3.277	8	0.553	0.447
	8	0.248	0.466	0.347	7	2.460	6	0.257	0.743
تنش شدید Severe stress	1	0.100	0.693	0.126	8	3.282	8	0.688	0.312
	2	0.335	0.458	0.422	4	2.446	5	0.395	0.605
	3	0.460	0.286	0.616	2	1.478	2	0.397	0.603
	4	0.276	0.446	0.382	5	2.090	3	0.850	0.150
	5	0.270	0.509	0.346	6	2.726	6	0.798	0.202
	6	0.702	0.064	0.917	1	0.201	1	0.380	0.620
	7	0.143	0.627	0.186	7	2.943	7	0.643	0.357
	8	0.317	0.433	0.423	3	2.234	4	0.846	0.154

(d_i^+) و (d_i^-) به ترتیب فاصله هر اکوتیپ از ژنوتیپ‌های ایده‌آل و ضعیف، SIIG شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل، MGIDI شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل برای هر اکوتیپ، ω_{i1} و ω_{i2} به ترتیب سهم عامل اول و دوم در شاخص MGIDI هر اکوتیپ.

(d_i^+) and (d_i^+) are the distance of each ecotype from the ideal and weak genotype, respectively; SIIG is the ideal genotype selection index; MGIDI is the multi-trait genotype–ideotype distance index for each ecotype, ω_{i1} and ω_{i2} are the contribution of the first and second factors in the MGIDI index for each ecotype, respectively.

بر اساس شاخص MGIDI، در شرایط تنش ملایم اکوتیپ ۶ کمترین مقدار (۰/۱۴۰) را داشت و اکوتیپ متحمل در برابر تنش خشکی محسوب شد، در رتبه بعدی هم اکوتیپ‌های ۴ و ۳ قرار داشتند. در شرایط تنش شدید نیز بعد از اکوتیپ ۶، اکوتیپ‌های ۳ و ۴ در رتبه بعدی قرار گرفتند. ازاین‌رو، در میان اکوتیپ‌های موردمطالعه می‌توان اکوتیپ ۶ را متحمل‌ترین اکوتیپ به تنش خشکی در نظر گرفت و اکوتیپ‌های ۳ و ۴ در رتبه بعدی قرار می‌گیرند. از سوی دیگر اکوتیپ‌های ۷ و ۲ در شرایط تنش ملایم بیشترین مقدار MGIDI را به خود اختصاص دادند و ازاین‌رو، این اکوتیپ‌ها به تنش خشکی حساس بودند. در شرایط تنش شدید نیز بیشترین مقدار MGIDI در اکوتیپ‌های ۱، ۷، ۶ و ۲ مشاهده شد که نشان می‌دهد این اکوتیپ‌ها به تنش خشکی حساس بودند (جدول ۴).

محاسبه سهم عامل‌های اول و دوم در شاخص MGIDI هر اکوتیپ (ωi1 و ωi2) نشان داد که عامل اول بیشترین سهم را در اکوتیپ‌های ۳، ۲ و ۱ داشت، درحالی‌که عامل دوم بیشترین سهم را در اکوتیپ‌های ۵، ۸ و ۶ نشان داد (جدول

۴). با توجه به این‌که هر اکوتیپ برای عامل‌هایی که سهم کمتری در آن‌ها نشان می‌دهد ازلحاظ صفات درون آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک‌تر است، بر این اساس می‌توان گفت که اکوتیپ متحمل ۶ برای صفاتی که بیشترین ضریب را در عامل اول دارند مانند GMP، Ys، Yp و غیره بیشترین مقدار را داشته و از این لحاظ به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک است. از سوی دیگر اکوتیپ ۳ که تحمل نسبتاً بالایی در شرایط تنش داشت کمترین سهم را برای عامل دوم دارا بود و ازاین‌رو برای صفاتی مانند TOL، SSI و درصد کاهش (RP) که در عامل دوم ضریب بالایی داشتند، دارای کمترین مقدار بوده و به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیک بود. به‌بیان‌دیگر اکوتیپ ۶ به لحاظ داشتن بیشترین عملکرد در شرایط تنش و شرایط معمول از درجه تحمل بالایی در برابر تنش خشکی برخوردار بود درحالی‌که اکوتیپ ۳ به دلیل این‌که کاهش عملکرد نسبتاً کمتری در مقایسه با اکوتیپ‌های دیگر داشت تحمل نسبتاً خوبی در برابر تنش خشکی از خود نشان داد.

شاخص MGIDI برای تسهیل انتخاب ژنوتیپ‌ها، توسط اولیوتو و ناردینو (Olivoto and Nardino, 2020) برای گزینش ژنوتیپ‌های مطلوب بر اساس اطلاعات چند صفت پیشنهاد شد. اولیوتو و همکاران (Olivoto et al., 2021) اخیراً از این شاخص برای انتخاب ژنوتیپ‌های ایده‌آل توت‌فرنگی استفاده کردند. همچنین استفاده از شاخص MGIDI توانست غربالگری ژنوتیپ‌های جو نسبت به تنش شوری را در مراحل اولیه رشد تسریع کند (Pour-Aboughadareh et al., 2021). انتظار می‌رود که استفاده از این شاخص در برنامه‌های گزینشی گیاهان بیشتر مورداستفاده قرار گیرد.

جدول ۵. ضرایب عاملی با چرخش واریماکس در تجزیه عاملی بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)

Table 5. Factor loading with varimax rotation after factor analysis based on principal component analysis (PCA)

صفات Characteristics	تنش ملایم Moderate stress		تنش شدید Severe stress	
	1	2	1	2
Yp	0.939	-0.335	0.070	0.997
Ys	0.848	0.528	0.952	0.304
TOL	-0.207	0.971	0.542	-0.838
SSI	0.238	0.969	0.982	-0.176
STI	0.982	0.175	0.794	0.596
YSI	0.241	0.967	0.973	-0.224
MP	0.996	0.083	0.487	0.873
GMP	0.981	0.192	0.779	0.626
YI	0.850	0.526	0.952	0.303
YRP	0.237	0.970	0.980	-0.189
HM	0.957	0.289	0.906	0.424
BM	0.825	0.275	0.885	0.268
HI	0.416	0.642	0.844	0.312
Variance (%) درصد واریانس	55.57	39.01	67.51	29.67
Cumulative (%) واریانس تجمعی	55.57	94.58	67.51	97.18

میانگین عملکرد (kg ha^{-1}) هر اکوتیپ در شرایط بدون تنش (Yp)، عملکرد (kg ha^{-1}) هر اکوتیپ در شرایط تنش (Ys)، شاخص تحمل (TOL)، شاخص متوسط بهره‌وری (MP)، شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین هارمونیک (HM)، شدت تنش خشکی (SI)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص تحمل تنش (STI)، درصد کاهش عملکرد (YRP)، شاخص عملکرد (YI)، پایداری عملکرد (YSI)، بیوماس کل (BM) و شاخص برداشت (HI).

Mean yield (kg ha^{-1}) of each ecotype in non-stress conditions (Yp), mean yield (kg ha^{-1}) of each ecotype under stress conditions (Ys), tolerance index (TOL), mean productivity (MP), geometric mean productivity (GMP), harmonic mean (HM), drought stress intensity (SI), stress sensitivity index (SSI), stress tolerance index (STI), yield reduction percentage (YRP), yield index (YI), yield stability (YSI), total biomass (BM), and harvest index (HI).

نتیجه‌گیری نهایی

برآورد شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) و شاخص فاصله چند متغیره از ژنوتیپ ایده‌آل (MGIDI) برای اکوتیپ‌های مختلف بر اساس صفات و شاخص‌های تحمل نشان داد که اکوتیپ ۶ با داشتن بیشترین مقدار SIIG و کمترین مقدار MGIDI در هر دو شرایط تنش، متحمل‌ترین اکوتیپ بود و اکوتیپ‌های ۴ و ۳ در رتبه بعدی قرار داشتند و جزو اکوتیپ‌های با تحمل تنش خشکی نسبتاً بالا دسته‌بندی شدند. در شرایط تنش ملایم اکوتیپ‌های ۷ و ۸ و در شرایط تنش شدید اکوتیپ‌های ۱ و ۷ با داشتن کمترین مقدار SIIG و بیشترین مقدار MGIDI حساسیت بالایی به تنش خشکی نشان دادند. در کل می‌توان نتیجه گرفت که اکوتیپ‌های موردمطالعه از تنوع ژنتیکی کافی برای استفاده در برنامه‌های اصلاحی برای دست آوردن لاین‌های با تحمل بالاتر در برابر تنش خشکی برخوردارند. همچنین استفاده از شاخص‌های SIIG و MGIDI در برنامه‌های گزینشی گیاهان زراعی می‌تواند موردتوجه بیشتری قرار گیرد.

منابع

Abdollahi Hesar, A., Sofalian, O., Alizadeh, B., Asghari, A., Zali, H., 2021. Investigation of frost stress tolerance in some promising rapeseed genotypes. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production. 31, 270-288. [In Persian with English summary].

Akhondi, M., Safarnejad, A., Lahoti, M., 2006. Effect of drought stress on proline accumulation and changes in elements in Yazdi, Nikshahri and Ranjer alfalfa (*Medicago sativa* L.). Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 10, 165-174. [In Persian with English summary].

Balsevich, J., 2008. Praire carnation (*Saponaria vaccaria*) – a potential new industrial/medicinal crop for the Praires. In: Fuelling the farm, 2008 SSCA Annual conference, Regina, Saskatchewan, Canada, February 12 and 13, pp. 46-50.

Balsevich, J.J., Ramirez-Erosa, I., Hickie, R.A., Dunlop, D.M., Bishop, G.G., Deibert, L.K., 2012. Antiprofilerative activity of Saporina vaccaria constituents and related componds. Fitoterapia. 83, 170-180.

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.

Duddu, H.S.N., Shirtliffe, S.J., 2010. Variation of seed dormancy and germination ecology of cow cockle (*Vaccaria hispanica*). Weed Science. 62, 483-492.

Efthimiadou, A., Karkanis, A., Bilalis D., Katenios, N., 2012. Cultivation of cow cockle (Vaccaria hispanica (Mill.) Rauschert). An industrial–medicinal weed. Industrial Crops and Products. 40, 307– 311.

Emam, Y., Ranjbari, A., Bahrani, M.J., 2006. Evaluation of yield and yield components in wheat cultivars under post-anthesis drought stress. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 11, 317-328. [In Persian with English summary].

Eskandari, H., Zehtab Salmasi, S., Ghasemi-Golozani, K., 2010. Evaluation of water use efficiency and grain yield of sesame cultivars as a second crop under different irrigation regimes. Journal of Sustainable Agriculture Science. 20, 39-51 [In Persian with English summary].

Farzadi, H., Zarifinia, N., Assareh, A., Shoushi Dezfuli, A., 2019. Evaluation of durum wheat (*Triticum durum* L.) genotypes tolerance to the terminal drought stress in the north of Khuzestan Province, Iran. Environmental Stresses in Crop Sciences. 12, 1063-1074. [In Persian with English summary].

Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. PP. Proceedings of the International Symposium on Adaptation of vegetables and other food crops in temperature and water stress. AVRDC Publication. Tainan. Taiwan.

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

Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campaline, R.G., Ricciardi, G.L., Borghi, B., 1997. Evaluation of field and laboratory predictors of

drought and heat tolerance in winter cereals. Journal of Plant Science. 77, 523-531.

Golestani, M., 2021. Evaluation of Thymus daenensis subsp. daenensis ecotypes using drought tolerance indices. Environmental Stresses in Crop Sciences, 14, 309-319. [In Persian with English summary].

Guclu-ustundag, O., Mazza, G., 2009. Effects of pressurized low polarity water extraction parameters on antioxidant properties and composition of cow cockle seed extracs. Plant Foods for Human Nutrition. 64, 32-38.

Hossain, A.B.S., Sears, A.G., Cox T.S., Paulsen, G.M., 1990. Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. Crop Science. 30, 622–627.

Jain, S., Yue-Lioang, R., Mei-wang, L.E., Ting-Xian, Y., Xiao-Wen, Y., Hong-Ving, Z., 2010. Effect of drought stress on sesame growth and yield characteristics and comprehensive evaluation of drought tolerance. Chinese Journal of Oil Crops Sciences. 4, 42-48.

Kaiser, H.F., 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. Psychometrika. 23, 187–200.

Khadem, A.R., Moruri, M., Glavi, M., Rusta, M., 2007. The effect of drought stress and application of different ratios of manure and superabsorbent polymer on yield and yield components of maize. Journal of Crop Science. 42, 123-115. [In Persian with English summary].

Kumar, M., Bussmann, R.W., Mukesh, J., Kumar, P., 2011. Ethnomedicinal uses of plants close to rural habitation in Garhwal Himalaya, India. Journal of Medicinal Plants Research. 5, 2252–2260.

Kamkar, B., Daneshmand, A.R., Ghooshchi, F., Shiranirad, A.H., Safahani Langeroudi, A.R., 2011. The effects of irrigation regimes and nitrogen rates on some agronomic traits of canola under a semiarid environment. Agricultural Water Management. 98, 1005-1012.

Mensah, J.K., Obadoni, B.O., Eroutor, P.G., Onome-Irieguna, F., 2006. Simulated flooding and drought effects on germination, growth, and yield parameters of sesame (*Sesame indicum* L.). African Journal of Biotechnology. 5, 1249-1253.

Najafi Mirak, T., Dastfal, M., Andarzian, B., Farzadi, H., Bahari, M., Zali, H., 2018. Evaluation of durum wheat cultivars and promising lines for yield and yield stability in warm and dry areas using AMMI model and GGE biplot. Journal of Crop Breeding. 10, 1-12. [In Persian with English summary].

Olivoto, T., Nardino, M., 2020. MGIDI: toward an effective multivariate selection in biological experiments. Bioinformatics. 10, 981-1093.

Olivoto, T., Lúcio, A.D.C., Da Silva, J.A.G., Sari, B.G., Diel, M.I., 2019. Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. Agronomy Journal. 111, 2961-2969.

Omidi, A.H., 2009. Effect of drought stress at different growth stages on seed yield and some agro-physiological traits of three spring sunflower cultivars. Seed and Plant Production Journal. 25, 15-31. [In Persian with English Summary].

Pour-Aboughadareh, A., Sanjani, S., Nikkhah-Chamanabad, H., 2021, Identification of salt-tolerant barley genotypes using multiple-traits index and yield performance at the early growth and maturity stages. Bulletin of the National Research Centre. 45, 117 -128.

Ramzi, E., Asghari, A., Khomari, S., Mohammaddoust e Chamanabad, H.R., 2018. Investigation of durum wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. durum Desf) lines for tolerance to aluminum stress condition. Journal of Crop Breeding. 10, 63-72. [In Persian with English Summary].

Rao, A.V., Koratkar, R., 1997. Anticarcinogenic effects of saponins and phytosterols. In: Shahidi, F. (ed.), Antinutrients and Phytochemicals in Food. ACS Symposium Series, vol. 662, pp. 313–324.

Rezvani Moghaddam, P., Norozpoor, Gh., Nabati, J., Mohammad Abadi, A.A., 2005. Effects of different irrigation intervals and plant density on morphological characteristics, grain and oil yields of sesame (*Sesamum indicum* L.). Iranian Journal of Field Crops Research. 3, 57-68. [In Persian with English Summary].

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

Salek Mearaji, H., Tavakoli, A., 2020. Evaluation of yield and some traits of two safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under different irrigation regimes. Environmental

Stresses in Crop Sciences. 13, 763-775. [In Persian with English summary].

Sang S.M., Lao, A.N., Leng, Y., Gu, Z.P., Chen, Z.L., Uzawa, J., Fujimoto, Y., 2000. Segetoside F a new triterpenoid saponin with inhibition of luteal cell from the seeds of *Vaccaria segetalis*. Tetrahedron Letters. 41, 9205–9207.

Shrestha, B.L., Baik, O.D., 2010. Thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of *Saporina vaccaria* seed particles. Journal of Transactions of the ASABE. 53, 1717-1725.

Sinaki, J.M., Majidi Heravan, E., Shirani Rad, A.H., 2007. Effect of water deficit during growth stages of canola (*Brassica napus* L.). American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science 2, 417-422.

Sio-Se Mardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K., Mohamadi, V., 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. Field Crops Research. 98, 222- 229.

Taiz, L., Zeiger, E., 2006. Plant Physiology, 4th ed., Sinauer Associates, Inc., Massachusetts.

Tian, M., Huang, Y., Wang, X., Cao, M., Zhao, Z., Chen, T., Yuan, C., Wang, N., Zhang, B., Li, C., Zhou, X., 2021. Vaccaria segetalis: A review of ethnomedicinal, phytochemical, pharmacological, and toxicological findings. Frontiers in Chemistry. 9, 278.

Wanga, X., Dong, H., Liu, Y., Yang, B., Wang, X., Huang, L., 2011. Application of highspeed counter-current chromatography for preparative separation of cyclic peptides from Vaccaria segetalis. Journal of Chromatogaphy. 879, 811-814.

Willenborg, C.J., Dosdall, L.M., 2011. First report nof redbacked cutworm damage to cow cockle (*Vaccaria hispanica* Mill.), a potential new crop for western Canada. Canadian Journal of Plant Science. 91, 425-428.

Yaghutipoor, A., Farshadfar, E., Saeedi, M., 2017. Investigation of bread wheat genotypes for drought tolerance using suitable combination method. Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences. 10, 247-256. [In Persian with English Summary].

Yendo, A.C.A., de Costa, F., Gosmann, G., Fett-Neto, A.G., 2010. Production of plant bioactive triterpenoid saponins: elicitation strategies and target genes to improve yields. Molcular Biotechnology. 46, 194–204.

Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T, Asghari, A., Hoseini, S.M. 2015. Appraising of drought tolerance relying on stability analysis indices in canola genotypes simultaneously, using selection index of ideal genotype (SIIG) technique: Introduction of new method. Biological Forum – An International Journal. 7, 425-436.

Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asghari, A., Zeinalabedini, M., 2016. Appropriate strategies for selection of drought tolerant genotypes in canola. Journal of Crop Breeding. 8, 77-90. [In Persian with English summary].