نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی
جلد بیست و سوم، شماره چهارم، ۱۳۹۵
http://jopp.gau.ac.ir

ارزیابی تحمل به تنش رطوبتی در اکوتیپ‌های زیره سبز با استفاده از شاخص‌های تحمل تنش

بهزاد صفری[۱]، *سیدمحمدمهدی مرتضویان[۲]، سیداحمد سادات نوری[۲] و بهروز فوقی[۲]

[۱]دانشجوی کارشناسی‌ارشد اصلاح نباتات، گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران،
[۲]استادیار گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران،
[۳]استاد گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران،
[٤]مربی گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹٤/٤/۲۱

چکیده

سابقه و هدف: عملکرد دانه زیره سبز در اکثر مناطق ایران به علت بروز تنش رطوبتی کاهش می‌یابد. تاکنون عمده ارزیابی‌ها روی تعداد محدودی اکوتیپ زیره سبز و یا عمدتاً در شرایط آبیاری مطلوب در کشور صورت گرفته است؛ بنابراین آزمایش با هدف ارزیابی توام اکوتیپ‌های زیره سبز رایج و مورد کشت در نقاط عمده زیره‌کاری کشور از نظر عملکرد دانه و تعیین اثر تنش خشکی در مرحله گلدهی بر عملکرد آن‌ها، شناسایی ارقام متحمل به تنش برای یافتن منابع ژنتیکی متحمل جهت تشکیل جمعیت‌های در حال تفرق با استفاده از شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش و نوع واکنش اکوتیپ‌ها به شرایط تنش خشکی و آبیاری نرمال در اکوتیپ‌های زیره سبز صورت گرفت.

مواد و روش‌ها: به‌منظور بررسی اثر تنش رطوبتی بر عملکرد دانه ٤۹ اکوتیپ بومی زیره سبز آزمایشی در قالب طرح لاتیس ۷×۷ با دو تکرار در مزرعه پژوهشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در سال زراعی ۹۲-۱۳۹۱ اجرا شد. اعمال تنش رطوبتی در مرحله ۵۰ درصد گلدهی به‌صورت ۳۰ درصد ظرفیت زراعی صورت گرفت. تجزیه واریانس در قالب طرح لاتیس و سنجش کارایی نسبی آن نسبت به طرح بلوک‌های کامل تصادفی صورت گرفته و پس از اعمال تصحیح لاتیس تجزیه واریانس در قالب طرح بلوک‌های تصادفی ادامه یافت.

*مسئول مکاتبه: mortazavian@ut.ac.ir

محاسبه ۱۱ شاخص تحمل به تنش براساس عملکرد در شرایط تنش خشکی و نرمال، محاسبه همبستگی بین مقادیر شاخص‌ها با یکدیگر و عملکرد دانه و نیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از ماتریس ضرایب همبستگی انجام گرفت.

یافته‌ها: کارایی نسبی طرح لاتیس نسبت به طرح بلوک‌های کامل تصادفی برای شرایط نرمال برابر ۱۵۳ درصد و در شرایط تنش ۱٤۸ درصد بود. بر اساس میزان عملکرد اکوتیپ‌های مورد بررسی در شرایط بدون تنش و تنش، ۱۱ شاخص تحمل و حساسیت به تنش برآورد گردید. نتایج تجزیه همبستگی، تجزیه به مولفه‌های اصلی و ترسیم بای‌پلات شاخص‌ها نشان داد که بین شاخص‌های محاسبه شده شاخص‌های MP، GMP، STI، Harm، K_1STI، K_2STI مناسب‌ترین شاخص‌ها برای انتخاب اکوتیپ‌های با پتانسیل و پایداری عملکرد بالا می‌باشند. تجزیه خوشه‌ای بر اساس شاخص‌های تحمل، اکوتیپ‌ها را در سه گروه جداگانه قرار داد به طوری‌که اکوتیپ‌های متحمل در گروه مشترکی قرار گرفتند. توزیع اکوتیپ‌ها در فضای بای‌پلات، وجود تنوع ژنتیکی بین اکوتیپ‌ها را نسبت به تنش خشکی نشان داد.

نتیجه‌گیری: اکوتیپ‌های کرمان (بافت)، خراسان جنوبی (درمیان)، یزد (صدوق) متحمل‌ترین و اکوتیپ‌های خراسان شمالی (اسفراین)، اصفهان (اردستان)، خراسان رضوی (کاشمر) به‌عنوان حساس‌ترین اکوتیپ‌ها به تنش خشکی مرحله گلدهی شناسایی شدند. لذا استفاده از این اکوتیپ‌ها به‌عنوان والدین تلاقی در برنامه‌های اصلاحی ارقام متحمل به خشکی توصیه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: تنوع ژنتیکی، زیره سبز، عملکرد، کم‌آبیاری

مقدمه

زیره سبز یکی از گیاهان دارویی ارزشمند دنیا می‌باشد و به‌عنوان مهم‌ترین گیاه دارویی اهلی در ایران شناخته شده است (۹). زیره بومی مناطق مرکزی و جنوبی آسیا بوده و در چند کشور از جمله هند، پاکستان، ترکیه، ایران، مصر و اسپانیا کشت می‌شود (۱۸). این گیاه در ایران در استان‌های خراسان، سمنان، یزد، کرمان، مرکزی آذربایجان شرقی و سیستان و بلوچستان به‌صورت دیم و آبی کشت می‌شود (۹) و هر ساله بر اهمیت و سطح زیر کشت آن افزوده می‌شود. به‌طور کلی ۹۰ درصد از زیره صادراتی ایران از استان‌های خراسان و سمنان به‌دست می‌آید (۲). زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) گیاهی یکساله و از تیره چتریان است که در صنایع دارویی، غذایی و آرایشی- بهداشتی کاربرد گسترده‌ای دارد (۹). گیاهان همواره در معرض طیف وسیعی از تنش‌های غیرزیستی از جمله تنش خشکی قرار دارند که هر ساله خسارت قابل توجهی را به اقتصاد و چرخه تولید کشورها تحمیل می‌کند (۱۱). عکس‌العمل گیاهان در برابر خشکی بستگی به نوع گیاه، مرحله رشدی آن، زمان وقوع تنش، فراوانی وقوع تنش، خصوصیات ذاتی خاک و هم‌چنین شرایط محیطی دارد (٤).

طبق تحقیقات صورت گرفته بیشتر مناطق کشت زیره‌سبز ایران مربوط به مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. در این مناطق زیره سبز اغلب در مراحل گلدهی تا مرحله دانه‌بندی با تنش خشکی مواجه است و عملکرد دانه آن تحت تأثیر تنش رطوبتی قرار می‌گیرد (۱؛ ۹). برای بیان کمی تأثیر تنش رطوبتی، ارزیابی عکس‌العمل و پایداری عملکرد در گیاهان، تاکنون شاخص‌های زیادی توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است. فرناندز (۱۹۹۲) در بررسی عملکرد ژنوتیپ‌ها در دو محیط تنش خشکی و بدون تنش چهار نوع واکنش برای ژنوتیپ‌ها قائل شد: عملکرد بالاتر از میانگین در هر دو شرایط تنش و بدون تنش (گروه A)، عملکرد بالاتر از میانگین در شرایط بدون تنش (گروه B)، عملکرد بالاتر از میانگین در شرایط تنش (گروه C) و عملکرد پایین‌تر از میانگین در هر دو شرایط تنش و بدون تنش (گروه D) (۷). تاکنون برای تفکیک ژنوتیپ‌های قرار گرفته در هر یک از این گروه‌ها، شاخص‌های متعددی بر اساس روابط ریاضی بین شرایط تنش و غیرتنش ارائه شده است (۷) ولی به‌طور کلی شاخص‌هایی که در هر دو شرایط تنش و غیرتنش دارای همبستگی بالایی با عملکرد باشند به‌عنوان بهترین شاخص‌ها معرفی می‌شوند، زیرا این شاخص‌ها قادر به شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو محیط هستند و می‌توان از آن‌ها برای تخمین پایداری عملکرد استفاده کرد

(۲۰). رزایلی و هامبلین (۱۹۸۱) شاخص تحمل به تنش[1] (TOL) و نیز شاخص متوسط محصول‌دهی[2] (MP) را ارائه دادند (۲۳). فیشر و مور (۱۹۷۸) شاخص حساسیت به تنش[3] (SSI) ژنوتیپ‌ها را پیشنهاد کردند (۸). این محققین نشان دادند که ژنوتیپ‌هایی با (SSI) کمتر از واحد، به خشکی متحمل‌تر هستند. فرناندز (۱۹۹۲) شاخص تحمل به تنش[4] (STI) و میانگین هندسی محصول‌دهی[5] (GMP) را ارائه داد (۷). میانگین هارمونیک[6] (HARM) از دیگر شاخص‌هایی است که برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر استفاده می‌شود (۷). شاخص پایداری عملکرد[7] (YSI) توسط باسلاما و چاپوق (۱۹۸٤) ارائه شد (۳). انتظار می‌رود ژنوتیپ‌هایی با YSI بالاتر عملکرد بالایی در شرایط تنش داشته باشند (۱۳). لن (۱۹۹۸) شاخص خشکی[8] (DI) را معرفی کرد (۱۲). شاخص‌های DI و STI نه تنها توان ژنوتیپ‌ها برای تولید عملکرد بالا در شرایط تنش را در نظر می‌گیرند بلکه عملکرد مناسب در شرایط مطلوب را نیز ملاک قرار می‌دهند. فرشادفر و سوتکا (۲۰۰۲) شاخص STI را به شاخص تحمل به تنش تغییریافته[9] (MSTI) اصلاح کردند (۵). بر این اساس آن‌ها شاخص KiSTI را محاسبه کردند که در آن Ki ضریب تصحیح STI در شرایط رطوبتی می‌باشد. بنابراین K_1STI و K_2STI به‌ترتیب شاخص‌های انتخاب بهینه در شرایط بدون تنش و تنش می‌باشند. موسوی و همکاران (۲۰۰۸) شاخص تحمل تنش‌های غیرزنده[10] (ATI) را معرفی کردند (۱۵). معتمدی میرحسینی و همکاران (۲۰۱۱) در آزمایش خود بر روی ۹ جمعیت زیره سبز، شاخص‌های GMP، STI و MP را به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها برای شناسایی اکوتیپ‌های مقاوم به خشکی معرفی کردند (۱۳). طباطبایی و همکاران (۲۰۱٤) در بررسی گیاه زیره‌سبز نشان دادند شاخص‌های GMP و STI به‌عنوان بهترین شاخص‌ها جهت گروه‌بندی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس محسوب می‌شوند (۲۵). کریمی افشار و همکاران (۲۰۱٤) با بررسی شاخص‌های تحمل به خشکی در اکوتیپ‌های زیره‌سبز،

1- Tolerance
2- Mean of productivity
3- Stress Susceptibility Index
4- Stress Tolerance Index
5- Geometric Mean Productivity
6- Harmonic Index
7- Yield Stability Index
8 -Drought Index
9- Modified Stress Tolerance Index
10- Abiotic Tolerance Index

شاخص‌های GMP، STI و MP را به عنوان شاخص‌های برتر در انتخاب اکوتیپ‌ها از نظر عملکرد در شرایط نرمال و تنش خشکی معرفی کردند (۱۰). با توجه به این‌که گیاه زیره سبز در مناطق گرم کشور کشت می‌شود و عمدتا با تنش خشکی روبه رو می‌باشد، موفقیت برای دستیابی به اکوتیپ‌های سازگار به شرایط محیطی تنش‌دار مستلزم مقایسه مواد ژنتیکی و معرفی اکوتیپ‌های برتر می‌باشد. تاکنون عمدهٔ ارزیابی‌ها بر روی تعداد محدودی اکوتیپ زیره سبز و یا عمدتاً در شرایط آبیاری نرمال در کشور صورت گرفته است؛ لذا این آزمایش با هدف ارزیابی توام متنوع‌ترین اکوتیپ‌های زیره سبز رایج و مورد کشت در نقاط عمده زیره‌کاری کشور از نظر عملکرد دانه و تعیین اثر تنش خشکی در مرحله گلدهی بر عملکرد آن‌ها، شناسایی ارقام متحمل به تنش برای یافتن منابع ژنتیکی متحمل جهت تشکیل جمعیت‌های در حال تفرق با استفاده از شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش و نوع واکنش اکوتیپ‌ها به شرایط تنش خشکی و آبیاری نرمال در اکوتیپ‌های زیره سبز صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر روی ٤٩ اکوتیپ بومی زیره‌سبز ایران که از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری شده، به‌منظور بررسی اثر تنش خشکی در مرحله گلدهی و تفکیک اکوتیپ‌ها از نظر میزان تحمل به تنش براساس شاخص‌های تحمل به تنش خشکی انجام شد (جدول ۱). محل اجرای آزمایش مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران واقع در ۲۰ کیلومتری جنوب شرقی تهران با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ٤٠ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰۲۷ متری از سطح دریا در سال زراعی ۹۲-۱۳۹۱ بود. از نظر اقلیمی منطقه پاکدشت جزء مناطق خشک محسوب شده و بارندگی‌ها عمدتاً در دو فصل پاییز و زمستان صورت می‌گیرد. درجه حرارت متوسط سالیانه به طور تقریبی ١٦/٨ درجه سانتی‌گراد و میزان تبخیر و تعرق سالیانه آن بیش از میانگین بارندگی سالیانه می‌باشد. خاک زراعی مورد استفاده دارای بافت لومی- سیلتی و pH ٧/٤ و EC ٣/٥٥ دسی زیمنس بر متر بود. اکوتیپ‌ها در قالب طرح لاتیس ساده ۷×۷ با دو تکرار در دو شرایط نرمال و تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی در محل داغ آب پشته‌ها کشت شدند. در هر واحد آزمایشی ٤ ردیف به طول ۲ متر با فاصله ردیف ۳۰ سانتی‌متر و تراکم ۱۲۰ بذر در مترمربع به‌صورت خطی و بادست در محل داغ آب پشته‌ها در نظر گرفته شد. فاصله بین دو کرت مجاور ٦٠ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آبیاری در مراحل رشد با توجه به میزان ظرفیت زراعی خاک و نمونه‌برداری خاک و با اطلاع از درصد

رطوبت خاک انجام گرفت. آبیاری محیط نرمال با توجه به اطلاعات خاک و شرایط جوی تقریباً هر ۱۰ روز یکبار صورت پذیرفت و آبیاری محیط تنش بعد از اعمال تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی با توجه به میزان رطوبت خاک انجام شد. شروع تنش در مرحله گلدهی و زمانی‌که در هر کرت ۵۰ درصد اکوتیپ‌ها به گل رفتند آغاز شد. کلیه عملیات زراعی کاشت، داشت (وجین علف‌های هرز) و برداشت غیر از آبیاری، برای هر دو شرایط یکسان و طوری انجام شد که گیاه با تنش دیگری روبه‌رو نشود. برداشت نهایی در زمان رسیدگی، پس از حذف حاشیه صورت گرفته و محصول هر یک از کرت‌های تحت تیمارهای آبی و تنش به‌طور جداگانه برداشت و عملکرد دانه، در مترمربع برآورد گردید. پس از به‌دست آوردن داده‌های خام، نرمال بودن خطاهای آزمایشی آزمون شد. تجزیه واریانس در قالب طرح لاتیس و سنجش کارایی نسبی آن نسبت به طرح بلوک‌های کامل تصادفی صورت گرفته و پس از اعمال تصحیح لاتیس تجزیه واریانس در قالب طرح بلوک‌های تصادفی ادامه یافت. سپس تجزیه مرکب بر اساس دو شرایط رطوبتی انجام شد. در نهایت با کمک شاخص‌های تحمل به تنش، ارزیابی واکنش ارقام به تنش خشکی صورت گرفت که این شاخص‌ها عبارت بودند از:

رابطه ۱ $SSI = \frac{1-\left(\frac{Ys}{Yp}\right)}{1-\left(\frac{\overline{Y}s}{\overline{Y}p}\right)}$

رابطه ۲ $TOL = Yp - Ys$

رابطه ۳ $MP = \frac{Ys+Yp}{2}$

رابطه ٤ $STI = \frac{Ys \times Yp}{\overline{Y}p^{2}}$

رابطه ۵ $HARM = \frac{2\,(Yp)(Ys)}{Yp+Ys}$

رابطه ٦ $K2 = Ys^{2}/\overline{Y}s^{2}$

رابطه ۷ $GMP = \sqrt{(Yp)(Ys)}$

رابطه ۸ $K1 = Yp^{2}/\overline{Y}p^{2}$

رابطه ۹ $YSI = \frac{Ys}{Yp}$

رابطه ۱۰ $DI = \frac{Ys \times (\frac{Ys}{Yp})}{\overline{Y}s}$

رابطه ۱۱ $ATI = \left[(Yp - Ys)/(\frac{\overline{Y}p}{\overline{Y}s})\right] \times \left[\sqrt{\overline{Y}p \times Ys}\right]$

در روابط ارائه شده Y_S و Y_P به‌ترتیب عملکرد در شرایط تنش خشکی و نرمال است. $\bar{Y}_s$ و $\bar{Y}_p$ به‌ترتیب متوسط عملکرد تمامی اکوتیپ‌های مورد آزمایش در شرایط تنش خشکی و شرایط بدون تنش می‌باشد. پس از محاسبه شاخص‌های فوق همبستگی بین مقادیر این شاخص‌ها با یکدیگر و عملکرد دانه در شرایط با و بدون تنش خشکی محاسبه شد تا بهترین شاخص‌ها برای شناسایی و انتخاب ارقام مقاوم به تنش خشکی مشخص شود. در مرحله بعدی برای مشخص شدن تغییرات داده‌های شاخص‌های تحمل به تنش، از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) با استفاده از ماتریس

ضرایب همبستگی استفاده شد و در آخر نمودار بای‌پلات بر اساس دو مولفه اصلی اول ترسیم شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها، محاسبه همبستگی بین شاخص‌ها و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از نرم‌افزارهای SAS Ver.9.1, Excel 2013, SPSS Ver. 16, و Mini Tab Ver. 16 انجام شد.

جدول ۱- محل جمع‌آوری و شماره‌بندی ٤٩ اکوتیپ زیره‌سبز در ۹ جمعیت (استان) ایران.

Table 1. The place of collection and ecotype coding of 49 cumin ecotypes from 9 populations (province) of Iran.

اکوتیپ (شهر) Ecotype (City)	استان Province	شماره اکوتیپ Ecotype number	اکوتیپ (شهر) Ecotype (City)	استان Province	شماره اکوتیپ Ecotype number
بیرجند	خراسان جنوبی	26	سروستان	فارس	1
Birjand	South Khorasan	26	Sarvestan	Fars	1
سرایان	خراسان جنوبی	27	سپیدان	فارس	2
Sarayan	South Khorasan	27	Sepidan	Fars	2
درمیان	خراسان جنوبی	28	سیوند	فارس	3
Darmian	South Khorasan	28	Sivand	Fars	3
فریدون	اصفهان	29	استهبان	فارس	4
Feridon	Esfahan	29	Estahban	Fars	3
سمیرم	اصفهان	30	اردکان	یزد	5
Semirom	Esfahan	30	Ardakan	Yazd	5
اردستان	اصفهان	31	بافت	یزد	6
Ardestan	Esfahan	31	Baft	Yazd	6
نائین	اصفهان	32	صدوق	یزد	7
Naein	Esfahan	32	Sadooq	Yazd	7
خوانسار	اصفهان	33	خاتم	یزد	8
Khansar	Esfahan	33	Khatam	Yazd	9
نطنز	اصفهان	34	سدرویی	یزد	9
Natanz	Esfahan	34	Sadrooi	Yazd	9
شهمیرزاد	سمنان	35	مراوه- تپه	گلستان	10
Shamirzad	Semnan	35	Marveh-Tappe	Golestan	10
سرخه	سمنان	36	آق‌قلا	گلستان	11
Sorkhe	Semnan	36	Agh Ghala	Golestan	11
ایوانکی	سمنان	37	جت	گلستان	12
Eivanakey	Semnan	37	Jat	Golestan	12
کلاته	سمنان	38	گنبد	گلستان	13

ادامه جدول ۱

13	Golestan	Gonbad	38	Semnan	Kalate
14	کرمان	بافت	39	خراسان شمالی	اسفراین
14	Kerman	Baft	39	Noth Khorasan	Esfarayen
15	کرمان	بردسیر	40	خراسان شمالی	شیروان
15	Kerman	Bardsir	40	Noth Khorasan	Shirvan
16	کرمان	چترود	41	خراسان شمالی	بجنورد
16	Kerman	Chatrood	41	Noth Khorasan	Bajnoord
17	کرمان	جوپار	42	خراسان شمالی	بانه
17	Kerman	Joopar	42	Noth Khorasan	Baneh
18	کرمان	کوهبنان	43	خراسان رضوی	گنبد
18	Kerman	Koohbanan	43	Razavi Khorasan	Gonbad
19	کرمان	ماهان	44	خراسان رضوی	فردوس
19	Kerman	Mahan	44	Razavi Khorasan	Ferdos
20	کرمان	راور	45	خراسان رضوی	تربت حیدریه
20	Kerman	Ravar	45	Razavi Khorasan	Torbet Heidarie
21	کرمان	رفسنجان	46	خراسان رضوی	تربت جام
21	Kerman	Rafsanjan	46	Razavi Khorasan	Torbat Jam
22	کرمان	سیرجان	47	خراسان رضوی	کاشمر
22	Kerman	Sirjan	47	Razavi Khorasan	Kashmar
23	کرمان	زرند	48	خراسان رضوی	تایباد
23	Kerman	Zarand	48	Razavi Khorasan	Taibad
24	خراسان جنوبی	قائن	49	خراسان رضوی	برادسکن
24	South Khorasan	Ghaen	49	Razavi Khorasan	Bardeskan
25	خراسان جنوبی	نهبندان			
25	South Khorasan	Nehbandan			

نتایج و بحث

کارایی نسبی اجرای آزمایش براساس طرح لاتیس نسبت به طرح بلوک‌های کامل تصادفی برای شرایط نرمال برابر ۱۵۳ درصد و در شرایط تنش ۱٤۸ درصد بود. جهت ادامه بررسی و تجزیه داده‌ها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی از تصحیح لاتیس استفاده شد (۲٦). نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که بین اکوتیپ‌ها از نظر صفات مورد مطالعه اختلاف بسیار معنی‌داری وجود دارد که نشان دهنده وجود تنوع کافی بین اکوتیپ‌های مورد مطالعه می‌باشد و می‌تواند در مطالعات بعدی

تحمل به خشکی در گیاه زیره‌سبز مورد استفاده قرار گیرد. تنش خشکی در مرحله گلدهی اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر عملکرد دانه داشت به طوری‌که باعث کاهش ۳۳/٦ درصدی عملکرد دانه در مترمربع شد. همچنین نتایج نشان داد که برهمکنش اکوتیپ × شرایط آبیاری در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد، که نشان می‌دهد روند تغییرات عملکرد اکوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف متفاوت است و تأثیرپذیر از تنش خشکی می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) عملکرد دانه اکوتیپ‌های زیره‌سبز تحت هر دو شرایط آبیاری نرمال و تنش.

Table 2. Combined ANOVA (MS) for cumin seed yield under both normal irrigation and stress conditions.

عملکرد دانه Seed yield	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییر Sources of variation
30814.66**	1	شرایط آبیاری Irrigation condition
7977.13	2	تکرار درون محیط Rep/Environment
856.51**	48	اکوتیپ Ecotype
90.78*	48	اکوتیپ × شرایط آبیاری Ecotype × Irrigation
57.71	292	اشتباه آزمایشی Error
12.23		ضریب تغییرات CV (%)
33.58		درصد کاهش صفت Reduction Rate (%)

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ns غیر معنی‌دار

ns Non significant, * Significant in 5% probability, ** Significant in 1% probability

تعیین ارقام متحمل و حساس بر اساس مقدار عددی هر شاخص: شاخص‌های مختلف مربوط به تنش خشکی بر اساس عملکرد ارقام در شرایط تنش آبی (Ys) و آبیاری نرمال (Yp) محاسبه گردید (جدول ۳). نتایج نشان داد که شناسایی اکوتیپ‌های متحمل به تنش توسط یک شاخص واحد، اطلاعات ضد و نقیضی به‌دست می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که در محیط آبیاری مطلوب بیشترین عملکرد دانه در مترمربع به ترتیب مربوط به اکوتیپ‌های خراسان شمالی (بانه)، کرمان

(رفسنجان)، خراسان شمالی (دارمیان) و خراسان رضوی (برداسکن) می‌باشد و اکوتیپ‌های سمنان (کلاته)، یزد (خاتم) و خراسان جنوبی (نهبندان) کمترین عملکرد دانه را در شرایط نرمال به خود اختصاص دادند. در شرایط تنش خشکی اکوتیپ‌های خراسان شمالی (بانه)، سمنان (شهمیزاد)، کرمان (رفسنجان) و یزد (صدوق) بیشترین میزان عملکرد دانه و اکوتیپ‌های خراسان شمالی (اسفراین)، اصفهان (نایین) و اصفهان (اردستان) کمترین میزان عملکرد دانه را به خود اختصاص دادند. بالا یا پایین بودن پتانسیل عملکرد در این اکوتیپ‌ها را می‌توان با متغیر بودن صفت‌های مربوط به عملکرد در آن‌ها و همچنین واکنش متفاوت نسبت به شرایط محیطی مرتبط دانست. هر چه مقدار عددی شاخص SSI کوچکتر باشد، حساسیت به تنش کمتر و تحمل نسبی ژنوتیپ به تنش رطوبتی بیشتر است، به عبارتی هرقدر عملکرد در شرایط تنش خشکی نزدیکتر به عملکرد پتانسیل (بدون تنش) باشد، به همان اندازه حساسیت آن ژنوتیپ به خشکی کمتر خواهد بود (۵). در این پژوهش با توجه به شاخص SSI، اکوتیپ‌های سمنان (شهمیزاد)، سمنان (ایوانکی) و کرمان (رفسنجان) دارای کمترین مقدار (مقاوم به تنش) و اکوتیپ‌های خراسان شمالی (اسفراین)، اصفهان (نائین) و فارس (سروستان) از حساسیت به تنش بالایی برخوردار بودند. بر اساس شاخص تحمل TOL نیز در واقع تحمل بیشتر مربوط به ژنوتیپی است که از میزان شاخص کوچکتری برخوردار باشد (٦). براساس این شاخص بین اکوتیپ‌های مورد بررسی اکوتیپ‌های سمنان (شهمیزاد)، سمنان (ایوانکی) و سمنان (کلاته) متحمل به خشکی و اکوتیپ‌های خراسان شمالی (اسفراین)، فارس (سروستان) و اصفهان (نائین) بیشترین میزان از نظر این شاخص را دارا بودند.

به اعتقاد برخی از محققان (٦؛ ۱۳) یک ژنوتیپ با عملکرد مناسب تحت شرایط مطلوب، باید در شرایط کم‌تر مساعد نیز عملکرد خوبی تولید کند تا بتواند به‌عنوان یک ژنوتیپ مناسب برای شرایط تنش خشکی در نظر گرفته شود. در واقع پایین بودن این شاخص‌ها لزوماً بر بالا بودن عملکرد در شرایط مناسب یا تنش دلالت ندارد، زیرا ژنوتیپ‌هایی یافت می‌شوند که دارای حساسیت بسیار پائینی نسبت به تنش خشکی می‌باشند، اما پتانسیل عملکرد پائینی نیز دارند (۱۵). برای مثال با توجه جدول میزان شاخص‌ها مشخص می‌شود که اکوتیپ سمنان (ایوانکی) که توسط این دو شاخص مقاوم شناخته شده‌است، نه به دلیل تولید عملکرد مناسب و بالا در هر دو شرایط بلکه صرفا به دلیل پایین بودن درصد تغییرات عملکرد، توسط این شاخص‌ها به‌عنوان اکوتیپ متحمل به تنش انتخاب شده است (جدول ۳)، و از آنجایی که پایین بودن درصد تغییرات به عنوان یک فاکتور تحمل به تنش،

بیشتر ارزش فیزیولوژی دارد تا زراعی، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب بر اساس شاخص حساسیت به تنش (SSI) و تحمل به تنش (TOL) باعث گزینش اکوتیپ‌هایی با عملکرد نسبتاً پایین، در محیط دارای تنش می‌گردد که به‌علت عملکرد پایین، از نظر زراعی نامطلوب می‌باشد. هر چه مقدار عددی شاخص‌های STI و GMP بالاتر باشد حاکی از تحمل به تنش و پتانسیل عملکرد بیشتر آن اکوتیپ در هر دو شرایط می‌باشد. در این پژوهش بر اساس شاخص‌های فوق اکوتیپ‌های ٤٢، ٢١، ٣٥ و ٢٨ مقاوم و اکوتیپ‌های ٣٨، ٢٩، ٣٩ و ٣١ حساس می‌باشند (جدول ٣). با توجه به نتایج به‌دست آمده، اکوتیپ‌های انتخابی بر اساس شاخص‌های MP و Harm نیز به‌علت همبستگی بالا با شاخص‌های فوق، تقریبا یکسان می‌باشد. بر اساس شاخص پایداری عملکرد (YSI) اکوتیپ‌های ٣٧، ٢١ و ٤٢ با مقادیر بالا برای این شاخص به‌عنوان متحمل‌ترین، و اکوتیپ‌های ٣٩، ٣٢ و ١ حساس‌ترین اکوتیپ‌ها به تنش شناخته شدند (جدول ٣). مقادیر بالاتر برای شاخص‌های DI و SNPI حاکی از تحمل بیشتر اکوتیپ به تنش خشکی می‌باشد. بر اساس این دو شاخص به‌ترتیب اکوتیپ‌های ٣٥، ٤٢ و٢١ متحمل‌ترین و اکوتیپ‌های ٣٩، ٣٢ و ١ حداقل تحمل به تنش را از خود نشان دادند (جدول ٣). شاخص ATI اکوتیپ‌های ١، ٤٢ و ٣ را متحمل‌ترین و اکوتیپ‌های ٣٨، ٣٧ و ٢٥ را غیرمتحمل‌ترین معرفی می‌کند. بر اساس شاخص‌های K_1STI و K_2STI اکوتیپ‌های ٤٢، ٢١ و ٢٨ متحمل‌ترین اکوتیپ‌ها هستند (جدول ٣). فرشادفر و همکاران (٢٠١٣) عنوان کردند شاخص‌های K_1STI و K_2STI از جمله شاخص‌های مناسب برای غربال ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در گندم می‌باشند (٦). استفاده از هر یک از این شاخص‌ها جهت ارزیابی عکس‌العمل گیاهان با نقاط قوت و ضعف مرتبط با روش محاسبه یا درگیر شدن یک شاخص با معیارهای دیگر بستگی دارد.

جدول ۳- مقادیر مربوط به شاخص‌های تحمل در ٤۹ اکوتیپ بومی زیره‌سبز.

Table 3. Values for tolerance indices in 49 cumin ecotypes.

K_2STI	K_1STI	ATI	DI	YSI	MP	Harm	STI	TOL	GMP	SSI	Ys	Yp	اکوتیپ Ecotype
0.20	0.54	3336.46	0.26	0.40	80.62	66.12	0.47	68.38	73.01	1.80	46.43	114.81	1
0.75	0.74	2146.85	0.69	0.67	91.41	87.90	0.71	35.84	89.64	0.99	73.50	109.33	2
0.31	0.65	3274.86	0.35	0.46	84.85	73.51	0.55	62.04	78.98	1.61	53.83	115.88	3
0.17	0.20	1282.06	0.44	0.62	65.23	61.72	0.35	30.23	63.45	1.13	50.11	80.34	4
1.77	1.52	2621.09	0.94	0.72	110.62	107.70	1.05	35.93	109.15	0.84	92.65	128.58	5
1.79	1.18	1464.92	1.11	0.82	106.39	105.38	0.98	20.70	105.88	0.53	96.04	116.74	6
3.46	2.33	2168.45	1.29	0.81	125.90	124.57	1.38	25.91	125.23	0.56	112.95	138.85	7
0.19	0.19	1134.05	0.48	0.66	65.12	62.40	0.36	26.62	63.75	1.02	51.81	78.43	8
0.39	0.42	1778.10	0.55	0.64	78.86	75.07	0.52	34.58	76.94	1.08	61.57	96.15	9
0.61	0.59	1888.82	0.66	0.68	86.51	83.30	0.63	33.29	84.89	0.97	69.86	103.15	10
0.64	0.61	1862.11	0.68	0.69	87.31	84.29	0.65	32.48	85.79	0.95	71.07	103.55	11
1.55	1.51	3026.18	0.84	0.68	109.32	105.24	1.01	42.21	107.26	0.98	88.21	130.43	12
1.42	1.00	1553.53	1.00	0.80	101.45	100.14	0.89	23.06	100.79	0.62	89.92	112.98	13
2.90	2.13	2449.04	1.17	0.78	122.13	120.26	1.29	30.24	121.19	0.66	107.01	137.25	14
0.14	0.21	1596.82	0.35	0.54	64.89	59.16	0.34	38.56	61.96	1.38	45.61	84.17	15
0.15	0.19	1327.86	0.39	0.59	63.54	59.43	0.33	32.33	61.45	1.22	47.38	79.71	16
0.17	0.28	1938.11	0.34	0.52	69.31	62.28	0.38	44.14	65.70	1.46	47.24	91.38	17
0.43	0.40	1480.06	0.63	0.69	78.75	76.15	0.53	28.60	77.44	0.93	64.45	93.05	18
0.98	0.92	2241.60	0.77	0.69	96.81	93.61	0.80	35.23	95.20	0.93	79.20	114.43	19
0.86	0.80	2113.00	0.74	0.69	93.68	90.53	0.74	34.33	92.09	0.93	76.51	110.84	20
5.25	3.19	1924.23	1.53	0.86	137.61	136.81	1.65	20.98	137.21	0.43	127.11	148.10	21
0.14	0.20	1554.85	0.35	0.55	64.58	59.09	0.34	37.66	61.78	1.36	45.75	83.41	22
0.26	0.36	1950.83	0.44	0.57	74.64	69.10	0.45	40.65	71.82	1.29	54.31	94.96	23
0.22	0.34	2027.68	0.39	0.54	73.26	66.84	0.43	43.36	69.97	1.38	51.58	94.94	24
0.21	0.20	1079.00	0.52	0.68	66.23	63.91	0.37	24.82	65.06	0.95	53.82	78.64	25
0.49	0.47	1697.19	0.63	0.68	81.87	78.82	0.57	31.61	80.33	0.98	66.06	97.68	26
1.14	0.89	1748.62	0.89	0.76	97.54	95.66	0.82	27.09	96.59	0.74	83.99	111.08	27
4.31	2.84	2263.30	1.38	0.82	132.55	131.31	1.53	25.67	131.93	0.53	119.72	145.39	28
0.10	0.18	1628.92	0.29	0.50	62.25	55.33	0.30	41.53	58.69	1.51	41.49	83.02	29
0.28	0.34	1761.85	0.47	0.60	74.09	69.53	0.45	36.73	71.77	1.20	55.72	92.45	30
0.10	0.21	1883.77	0.27	0.46	64.33	55.71	0.31	47.08	59.87	1.62	40.79	87.87	31
0.12	0.38	2963.47	0.21	0.37	73.67	58.07	0.38	67.80	65.41	1.90	39.77	107.57	32
1.24	1.01	1982.25	0.89	0.74	100.31	98.09	0.86	29.90	99.19	0.78	85.36	115.26	33
1.86	1.31	1770.78	1.08	0.80	108.59	107.20	1.02	24.56	107.89	0.61	96.31	120.87	34
5.57	2.46	-65.30	1.89	1.01	133.85	133.85	1.57	-0.73	133.85	-0.02	134.21	133.48	35
0.27	0.38	2045.82	0.43	0.57	75.72	69.87	0.46	42.09	72.73	1.31	54.67	96.76	36
1.51	0.80	554.55	1.22	0.92	98.84	98.66	0.86	8.40	98.75	0.25	94.64	103.04	37
0.10	0.08	540.73	0.48	0.75	53.65	52.57	0.25	15.24	53.10	0.75	46.03	61.27	38
0.07	0.30	2777.23	0.16	0.33	69.10	51.56	0.31	69.62	59.69	2.02	34.29	103.91	39
0.65	0.69	2243.14	0.64	0.65	89.39	85.25	0.67	38.45	87.29	1.07	70.16	108.61	40
0.41	0.54	2317.22	0.50	0.59	82.83	77.15	0.56	43.37	79.94	1.25	61.14	104.52	41
8.53	5.68	3282.09	1.63	0.82	157.49	155.93	2.16	31.34	156.71	0.55	141.82	173.16	42
0.31	0.37	1768.71	0.50	0.62	75.82	71.56	0.48	35.93	73.66	1.16	57.85	93.78	43
0.89	0.97	2714.53	0.68	0.64	97.09	92.35	0.79	42.90	94.69	1.09	75.64	118.54	44
0.27	0.39	2091.41	0.42	0.56	75.78	69.65	0.46	43.07	72.65	1.33	54.24	97.31	45
0.25	0.23	1134.48	0.54	0.69	68.56	66.24	0.40	25.19	67.39	0.94	55.96	81.15	46
0.16	0.39	2731.41	0.27	0.43	74.52	62.48	0.41	59.90	68.23	1.73	44.57	104.47	47
0.82	0.72	1853.16	0.76	0.71	91.71	89.15	0.72	30.67	90.42	0.86	76.38	107.05	48
2.85	2.25	2816.99	1.11	0.75	122.90	120.45	1.30	34.64	121.67	0.74	105.57	140.22	49

انتخاب بهترین اکوتیپ‌ها و شاخص‌ها بر اساس تجزیه همبستگی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی: نتایج همبستگی بین عملکرد در هر دو محیط و شاخص‌های محاسبه شده در جدول ٤ آمده است. همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح یک درصد بین شاخص‌های SSI، TOL و ATI نشان می‌دهد که این شاخص‌ها قدرت نسبتاً یکسانی دارند. با توجه به این‌که همبستگی عملکرد در شرایط تنش خشکی با شاخص TOL و ATI منفی و معنی‌دار می‌باشد و مقادیر کمتر این شاخص‌ها نشان دهنده تحمل بیشتر به شرایط تنش خشکی می‌باشد وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بالا بین آنها قابل توجیه است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین همبستگی رتبه‌ای مثبت (**۱) میان شاخص‌های STI و GMP وجود دارد. بیشترین همبستگی رتبه‌ای منفی (**۱-) میان شاخص‌های SSI و YSI مشاهده شد (جدول ٤). همبستگی بین عملکرد اکوتیپ‌ها در شرایط تنش و بدون تنش نیز مثبت و معنی‌دار می‌باشد که نشان می‌دهد در این تحقیق اکثر اکوتیپ‌هایی که در شرایط مطلوب پتانسیل عملکرد بالاتری داشتند در شرایط تنش رطوبتی نیز از عملکرد بالایی برخوردار بودند. به‌طور کلی شاخص‌هایی که در هر دو شرایط تنش و غیرتنش دارای همبستگی بالایی با عملکرد باشند به‌عنوان بهترین شاخص‌ها معرفی می‌شوند (نعیمی و همکاران، ۲۰۰۸). این نتیجه موافق نظر سلیمانی فرد و همکاران (۲۰۰۹)، نوری و همکاران (۲۰۱۱)، معتمدی میرحسینی و همکاران (۲۰۱۱) و فرشادفر و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشد (۲٤؛ ۲۱؛ ۱۷؛ ٦). همبستگی بین شاخص‌های تحمل به خشکی و عملکرد می‌تواند به عنوان معیاری مناسب برای انتخاب بهترین اکوتیپ‌ها و شاخص‌ها محسوب شود.

جدول ٤- همبستگی بین شاخص‌های تحمل به تنش خشکی در اکوتیپ‌های زیره سبز.

Table 4. Correlations among drought tolerance indices in cumin ecotypes.

Index	Yp	Ys	SSI	GMP	TOL	STI	Harm	MP	YSI	DI	ATI	K1 STI	K2STI
Yp	1	0.77**	-0.51**	0.89**	-0.37**	0.89**	0.85**	0.92**	0.51**	0.68**	NS	0.95**	0.50**
Ys		1	-0.88**	0.96**	-0.79**	0.96**	0.98**	0.94**	0.88**	0.97**	-0.59**	0.91**	0.90**
SSI			1	-0.77**	0.97**	-0.77**	-0.80**	-0.75**	-1**	-0.95**	0.86**	-0.64**	NS
GMP				1	-0.66**	1**	0.99**	0.99**	0.77**	0.91**	-0.42**	0.98**	0.83**
TOL					1	-0.66**	-0.69**	-0.63**	-0.98**	-0.88**	0.94**	-0.57**	NS
STI						1	0.99**	0.99**	0.77**	0.91**	-0.42**	0.98**	0.89**
Harm							1	0.98**	0.80**	0.93**	-0.46**	0.96**	0.92**
MP								1	0.75**	0.89**	-0.38**	0.99**	0.86**
YSI									1	0.95**	-0.86**	0.69**	NS
DI										1	-0.71**	0.84**	0.65**
ATI											1	-0.31*	0.30*
K1 STI												1	0.77**
K2STI													1

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ns غیر معنی‌دار

** Significant in 1% probability * Significant in 5% probability NS Non significant.

جهت آگاهی از اینکه آیا شاخص‌های تعیین شده به خوبی قادر به تفکیک اکوتیپ‌های گروه A از اکوتیپ‌های گروه D فرناندز هستند و نیز تبیین بیشتر روابط بین شاخص‌های تحمل به تنش خشکی و اکوتیپ‌های مورد بررسی از نمودارهای دو بعدی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد (جدول ۵ و شکل ۱). در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی دو مولفه اول که مقادیر ویژه بزرگتر از یک را داشتند، انتخاب شدند. این دو مؤلفه بیش از ۹۰ درصد تغییرات را توجیه نمودند. مؤلفه اول ۷٦/٦۰ درصد تغییرات را توجیه کرد. این مؤلفه دارای ضرایب منفی و معنی‌دار برای شاخص‌های SSI، TOL و ATI بود و همچنین ضرایب مثبت و معنی‌دار از نظر شاخص‌های مربوط به پتانسیل عملکرد نظیر STI، GMP، MP و Harm داشت (جدول ۵). بنابراین مولفه اول به عنوان مؤلفه مؤثر بر پتانسیل عملکرد و تحمل به تنش نام‌گذاری شد، که قادر به جداسازی اکوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در هر دو شرایط است. هر چه مقدار این مؤلفه برای اکوتیپی بیشتر باشد، مطلوب‌تر است. نتایج همبستگی‌ها نیز نشان‌دهنده وجود رابطه‌ی قوی مثبت و معنی‌دار میان عملکرد دانه در هر دو محیط با شاخص‌های MP، GMP، STI و Harm می‌باشد (جدول ٤). مولفه دوم با توجیه ۱۵/۳۵ درصد از تغییرات کل در ماتریس داده‌ها، بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار را با عملکرد در شرایط مطلوب و نیز شاخص‌های SSI، TOL، ATI و SNPI داشت. مؤلفه دوم دارای ضریب منفی و معنی‌دار برای شاخص YSI می‌باشد (جدول ۵). از این رو مؤلفه دوم به نام مولفه حساسیت به تنش نامگذاری شد که با برخی از نتایج منجم و همکاران (۲۰۱۱)، محمدی و همکاران (۲۰۱۱) و فرشادفر و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد (١٤؛ ۱۳؛ ٦). در این حالت هر چه مقدار این مؤلفه برای اکوتیپی کمتر باشد، مطلوب‌تر است.

با توجه به مستقل بودن دو مؤلفه اول و دوم از هم می‌توان آنها را عمود بر هم رسم کرد و مقایسه وزنی هر کدام از متغیرها در مؤلفه‌های اصلی را به صورت ضرایب همبستگی بر روی نمودار نشان داد (شکل ۱). لذا با حذف یازده مؤلفه انتهایی که سهم چندانی در تغییرات کل ندارند، توجیه تغییرات از طریق دو مؤلفه اول و دوم انجام گرفت. روابط بین شاخص‌های مختلف به‌صورت گرافیکی در شکل ۱ آمده است. زاویه بین بردار شاخص‌ها در نمودار دو بعدی تصویر کاملی از روابط بین شاخص‌های تحمل به خشکی را نشان می‌دهد. هر چه زاویه بین بردارهای شاخص‌ها کمتر باشد، همبستگی میان شاخص‌ها بیشتر است. به‌طور کلی کسینوس زاویه بین بردارها میزان همبستگی را نشان می‌دهد (۲۷). بر این اساس و با توجه به شکل، شاخص‌های SSI، TOL و ATI در گروه شاخص‌هایی قرار می‌گیرند که بیشترین همبستگی را با مؤلفه دوم دارند (زاویه میان مؤلفه و شاخص‌های فوق کمتر از

۹۰ درجه می‌باشد) (شکل ۱). ماهیت این شاخص‌ها بـه گونـه‌ای اسـت کـه بیشـتر بـر روی مکـانیزم محصول‌دهی در شرایط تنش تکیه می‌کنند؛ در نتیجه این شاخص‌ها با عملکرد در شرایط نرمال (Yp) همبستگی بیشتری دارند (شکل ۱). شاخص‌های فوق همبستگی بالا و معنی‌داری با یکدیگر دارند امـا شاخص ATI نسبت به شاخص‌های SSI و TOL تأکید بیشتری بر روی عملکرد در شرایط نرمال دارد (شکل ۱) که این نتایج با یافته‌های فرشادفر و همکاران (۲۰۱۳) و موسوی و همکاران (۲۰۰۸) در یک راستا می‌باشد (٦؛ ۱۵).

جدول ۵- بردار ویژه دو عامل اول برای شاخص‌های مختلف در دو شرایط نرمال و تنش کم‌آبی.

Table 5. Eigen vectors for first two factors of different selection indices in both normal and low irrigated conditions.

شاخص‌ها Indices	مؤلفه اول First factor	مؤلفه دوم Second Factor
Yp	0.82	0.54
Ys	0.99	0.05
SSI	-0.87	0.44
TOL	-0.81	0.56
MP	0.95	0.26
GMP	0.97	0.22
STI	0.97	0.23
Harm	0.98	0.19
YSI	0.88	-0.44
DI	0.99	-0.09
ATI	-0.71	0.65
K_1 STI	0.88	0.35
K_2 STI	0.31	0.89
مقادیر ویژه Eigen value	9.64	1.93
درصد توجیه واریانس Variance	76.60	15.35
درصد تجمعی واریانس Cumulative variance	76.60	91.95

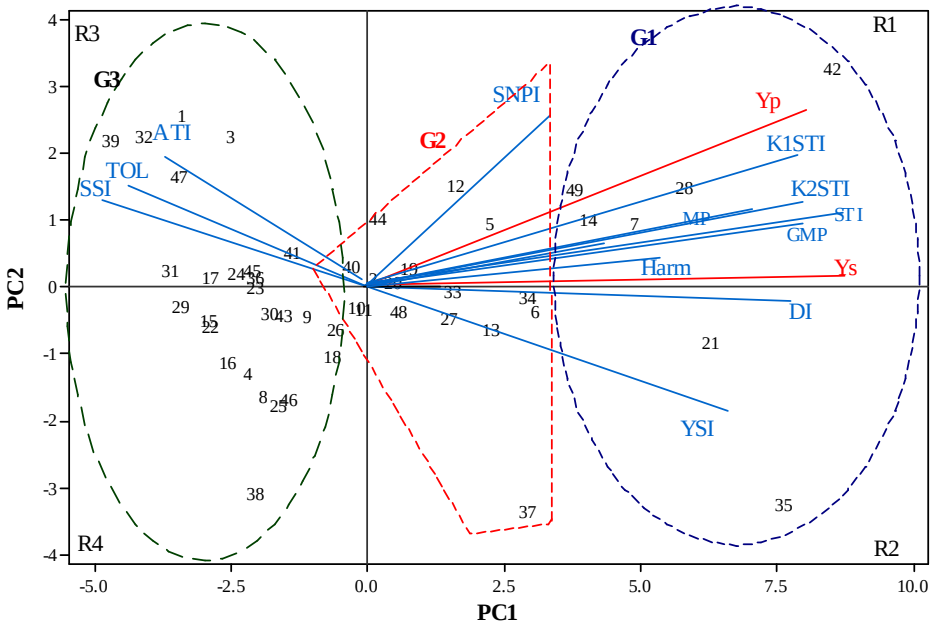
با توجه به مطالب ذکـر شـده، از آنجـا کـه شـاخص‌هـای MP، GMP، Harm، K_1STI) MSTI و K_2STI) و STI همبستگی بالا، مثبت و معنی‌داری با عملکرد در شرایط نرمال و تنش خشـکی نشـان دادند و با یکدیگر دارای همبستگی رتبه‌ای بالایی بودند، لذا به عنوان شاخص‌های برتر انتخـاب بـرای

عملکرد در دو محیط معرفی می‌شوند. این قسم از نتایج با نتـایج پـورچ (۲۰۰٦)، زهـراوی (۲۰۰۹) و فرشـادفر (۲۰۱۳) مطابقـت دارد (۲۲؛ ۲۷؛ ٦). شـاخص‌هـای SSI، TOL و ATI بـه علـت نداشـتن همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد در شرایط نرمال و تنش نمـی‌تواننـد در انتخـاب اکوتیـپ‌هـای متحمل با پتانسیل عملکرد بالا معرفی شوند.

با توجه به نمودار بای‌پلات و مقادیر بـه‌دسـت آمـده بـرای مؤلفـه اول و دوم مشـخص مـی‌شـود اکوتیپ‌هایی که در ناحیه ۱ و ۲ بای‌پلات و نزدیک محور افقی قـرار دارنـد، اکوتیـپ‌هـای بـا مقـادیر عملکرد بالا در هر دو شرایط و حساسیت به تنش کمتری می‌باشند. از میان این اکوتیپ‌ها، آن‌هایی که در ناحیه ۲ بای پلات قرار دارند نسبت به اکوتیپ‌هایی که در ناحیه ۱ قرار دارند دارای مقادیر پایین‌تر شاخص‌های TOL و SSI می‌باشند. به عبارت دیگر به علت کم بودن تغییرات عملکردشان در شرایط تنش نسبت به شرایط مطلوب علاوه‌بر پتانسل عملکرد بالا از پایداری عملکرد بیشتری نیز برخوردارند. اکوتیپ‌های که در ناحیه ۳ و٤ بای پلات و در دو طرف مولفـه اول (محـور افقـی) قـرار دارنـد دارای مقادیر کمی برای شاخص‌های SSI، TOL و ATI (حساسیت بـه تـنش و پتانسـیل عملکـرد پـایین) هستند و عملکرد پایینی در شرایط نرمال و تنش خشکی دارند و بر اساس شاخص SSI از حساسیت بالاتری برخوردارند. از میان این اکوتیپ‌ها، آنهایی که در ناحیه ۳ بای پلات قرار دارند، از آنجایی کـه مولفه دوم، اکوتیپ‌های با مقادیر بالای شاخص‌های SSI، TOL و ATI را انتخاب می‌کند از پایداری عملکرد کمتری برخوردار هستند و اکوتیپ‌هایی که در ناحیه ٤ بای‌پلات و در زیر محـور افقـی قـرار دارند اکوتیپ‌هایی هستند که فقط دارای درصد تغییـرات کـم در عملکـرد (پتانسـیل عملکـرد پـایین) هستند (شکل ۱).

جهت گروه‌بندی دقیق‌تر اکوتیپ‌ها بر روی نمودار دو بعدی بر اساس مجموع شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش، با توجه به مقادیر مؤلفـه اول و دوم بـه‌دسـت آمـده بـرای هـر اکوتیـپ تجزیـه خوشه‌ای به روش وارد و فاصله اقلیدوسی به‌عنوان معیار تشابه انجام گرفت و گروه‌بنـدی‌هـا بـر روی نمودار بای‌پلات مشخص شد (شکل ۱). تجزیه خوشه‌ای، اکوتیپ‌ها را در ۳ گروه اصلی گـروه‌بنـدی نمود. همان‌طوری که در شکل مشخص می‌باشد در گروه اول اکوتیپ‌هایی قرار گرفتند که نسـبت بـه سایر گروه‌ها از پتانسیل عملکرد بالایی در شرایط نرمال و تنش خشکی برخوردارند. گروه اول، خـود به سه زیر گروه تقسیم می‌شود که زیر گروه اول شـامل اکوتیـپ‌هـای کرمـان (رفسـنجان) و سـمنان (شهمیزاد) می‌باشد که میزان عملکرد بالایی در شرایط تنش از خود نشان داده‌اند؛ زیر گروه دوم مربوط

به اکوتیپ خراسان شمالی (بانه) است که بیشترین میزان عملکرد پتانسیل را دارا می‌باشد؛ زیر گروه سوم، شامل اکوتیپ‌هایی است که دارای پتانسیل عملکرد مطلوب و میزان تحمل مطلوب نسبت به تنش خشکی می‌باشند. این زیر گروه شامل اکوتیپ‌های خراسان رضوی (بردسکن)، کرمان (بافت)، یزد (صدوق) و خراسان جنوبی (دارمیان) می‌باشد. اعضای گروه دوم که به دو زیر گروه تقسیم می‌شود نسبت به همدیگر پتانسیل عملکرد یکسانی داشته اما اکوتیپ های زیر گروه اول نسبت به زیر گروه دوم از پایداری عملکرد کمتری برخوردارند. اکوتیپ‌هایی که در گروه سوم قرار دارند دارای عملکرد پایین و همچنین میزان تغییرات عملکرد در شرایط تنش و نرمال ناچیز می‌باشند (شکل ۱).



شکل ۱- بای‌پلات حاصل از مؤلفه‌های اول دوم شاخص‌های تحمل به تنش خشکی اکوتیپ‌های زیره‌سبز.

Figure 1. Biplot based on first two principle components of drought tolerance indices in cumin ecotypes.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی در مرحله گلدهی اثر کاهشی بارزی بر عملکرد دانه دارد. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده از این آزمایش بیانگر آن است که بین اکوتیپ‌های زیره‌سبز مورد

بررسی از لحاظ تولید دانه در شرایط تنش و بدون تنش و همچنین از لحاظ تحمل بـه تـنش رطـوبتی تفاوت معنی‌داری وجود دارد. نتایج تجزیه همبستگی و مؤلفه‌های اصلی بر روی شاخص‌های محاسبه شده نشان داد که شاخص‌های MP، GMP، STI، Harm، K_1STI و K_2STI به‌دلیل همبستگی بالا با عملکرد دانه در هر دو شرایط و همبستگی رتبه‌ای بالا با یکدیگر، مناسب‌ترین شاخص‌ها برای انتخاب اکوتیپ‌های با عملکرد بالا و متحمل در شرایط تنش خشکی در این پژوهش می‌باشند. بر اساس ایـن شاخص‌های برتر و بای‌پلات ترسیم شده، از بین ٤٩ اکوتیپ زیره‌سبز مورد مطالعه، اکوتیپ‌های کرمان (بافت)، خراسان جنوبی (دارمیـان)، یـزد (صـدوق) متحمـل‌تـرین و اکوتیـپ‌هـای خراسـان شـمالی (اسفراین)، اصفهان (اردستان)، خراسان رضوی (کاشمر) به‌عنوان حساس‌تـرین اکوتیـپ‌هـا بـه تـنش خشکی گلدهی شناسایی شدند. لذا، این اکوتیپ‌ها جهت تلاقی و تجزیه ژنتیکی بـه روش دای‌آلـل و تجزیه میانگین نسل‌ها برای تحمل به خشکی و همچنین برای نقشه‌یـابی QTL و انتخـاب بـه کمـک نشانگر جهت تحمل به خشکی در مرحله گلدهی توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

نگارندگان مقاله از صندوق حمایت از پژوهشگران معاونت علمی ریاسـت جمهـوری و معاونـت پژوهشی دانشگاه تهران به‌خاطر حمایت مالی این پروژه سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع

1. Bahraminejad, A., Mohammadi-Nejad, Gh. and Khadir, M. 2011. Genetic diversity evaluation of Cumin (*Cumin cyminum L.)* based on phenotypic traits. Aust. J. Crop Sci. 5: 301-307.
2. Balndri, A. and Rezvani moghadam, V. 1994. Botanic collection and characterization of cumin (*Cuminum cyminum* L.) landraces of Iran. Scientific Research and Technology - Institute of Khorasan. 84-92. (In Persian)
3. Bouslama, M. and Schapaugh, W. 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. Crop Sci. 24(5): 933-937.
4. Eskandari, H. and Kazemi, K. 2010. Response of different bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes to post-anthesis water deficit. Not. Sci. Biol. 2(4): 49-52.
5. Farshadfar, E. and Sutka, J. 2002. Screening drought tolerance criteria in maize. Acta Agron. Hungarica. 50(4): 411–416.

6. Farshadfar, E., Poursiahbidi, M.M. and Safavi, S.M. 2013. Assessment of drought tolerance in land races of bread wheat based on resistance/tolerance indices. Int. J. Adv. Bio. Biom. Res. 2: 143-158.
7. Fernandez, G.C. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. International symposium on adaptation of vegetables and other food crops in temperature and water stress. Taiwan. 257- 270.
8. Fischer, R.A. and Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. Crop Past. Sci. 29(5): 897-912.
9. Kafi, M., Rashed-Mohassel, M.H., Koocheki, A. and Mlafylaby, A. 2003. Technology, production and processing cumin. Publications Excellence in Special Crops, Ferdowsi University of Mashhad. Press, 195p. (In Persian)
10. Karimi Afshar, A., Baghizadeh, A., Mohammadi-Nejad, Gh. and Abedi, J. 2014. Assessment of cumin (*Cuminum cyminum* L.) genotypes under drought stress based on drought tolerance indicators, 1st International and 13th Iranian Genetics Congress, The Thirteenth International Congress of Genetics Congress. 1-4. (In Persian)
11. Knight, C.A., Vogel, H., Kroymann, J., Shumate, A., Witsenboer, H. and Mitchell-oldst, T. 2006. Expression profiling and local adaptation of *Boechera holboellii* populations for water use efficiency across a naturally occurring water stress gradient. Mol. Ecol. 15(5): 1229-1237.
12. Lan, J. 1998. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. Acta Agri. Boreali-Occidentalis Sinica. 7(3): 85-87.
13. Mohammadi, R., Armion, M., Kahrizi, D. and Amri, A. 2010. Efficiency of screening techniques for evaluating durum wheat genotypes under mild drought conditions. Int. J. Plant Prod. 4(1): 1735-8043.
14. Monajem, S., Mohammadi, V. and Ahmadi A. 2011. Evaluation of drought tolerance in some rapeseed Cultivars based on stress evaluation indices, Elec. J. Crop. Prod., 4(1): 151-169.
15. Moosavi, S.S., Yazdi-Samadi, B., Naghavi, M.R., Zali, A.A., Dashti, H. and Pourshahbazi, A. 2008. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. Desert. 12: 165-178.
16. Motamedi-Mirhoseini, L., Mohamadi-Nejad, Gh., Bahraminejad, A., Golkar, P. and Mohammadinejad, Z. 2011. Evaluation of cumin (*Cuminum cyminum* L.) landraces under drought stress based on some agronomic traits. Afr. J. Plant Sci. 5(14): 819-822.
17. Motamedi-Mirhosseini, L., Mohammadi-Nejad, G., Golkar, P. and Bahrami-Nejad, A. 2011. Evaluation of Some Drought Resistance Criteria in Cumin (Cuminum Cyminum L.) Landraces. Adv. Environ. Biol. 5(8): 2369-2372.
18. Mozaffarian, V. 1983. The family of umbelliferae in Iran-Keys and distribution. Research Institute of Forest and Rangelands Press, Tehran, 114-116.

19. Naeemi, M., Akbari, Gh., Shirani Rad, A.H., Modares Sanavi, S.A.M., Sadat-Noori, S.A. and Jabari, H. 2008. Evaluation of drought tolerance in different Canola cultivars based on stress evaluation indices in terminal growth duration. Eelec. J. Crop Prod. 1(3): 83-98. (in Persian)
20. Nofouzi, F., Rashidi, V. and Tarinejad, A.R. 2008. Path Analysis of Grain Yield with Its Components in Durum Wheat under Drought Stress. Int. Meeting on Soil Fertility Land Management and Agro-climatology. Turkey. 681-686.
21. Nouri, A., Etminan, A., Jaime, A., Silva, T.D. and Mohammadi, R. 2011. Assessment of yield, yield- related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Tritium turjidum* var. durum Desf.). Aust. J. Crop Sic. 5(1): 8-16.
22. Porch, T.G. 2006. Application of stress indices for heat tolerance screening of common bean. J. Agron. Crop Sci. 192: 390-394.
23. Rosielle, A. and Hamblin, J. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. Crop Sci. 21(6): 943-946.
24. Soleymanifard, A., Fasihi, Kh., Nasrirad, H. and Naseri, R. 2010. Evolution of stress tolerance indices in durum wheat genotypes. J. Plant Prod. 17(2): 39-58. (In Persian)
25. Tabatabaei, S.M., Mohammadi-Nejad, Gh. and Yousefi, Kh. 2014. Yield assessment and drought tolerance indices in cumin ecotypes. J. Water Res. Agri. 28(1): 163-170. (In Persian)
26. Yazdi-Samadi, B., Rezaei, A. and Valyzadeh, M. 2004. Statistical designs in agricultural research. University of Tehran Press. 739p. (In Persian)
27. Zahravi, M. 2009. Evaluation of genotypes of wild barley (*Hordeum spontaneum*) based on drought tolerance indices. Seed Plant Improv. J. 25(1): 533-549. (In Persian)