doi: 10.22124/c.2019.11977.1447

دانشگاه گیلان
دانشکده علوم کشاورزی

تحقیقات غلات

دوره هشتم/ شماره چهارم/ زمستان ۱۳۹۷ (۴۶۹-۴۵۵)

بررسی شاخص‌های تحمل به تنش خشکی در ارقام گندم نان با روش بوت‌استرپ

خدیجه دولتی‌پشم[۱]، امیدعلی اکبرپور[۲]* و حمیدرضا عیسوند[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۴

چکیده

شاخص‌های تحمل به تنش، از جمله پرکاربردترین روش‌های انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش در بین محققین می‌باشند. در این تحقیق، یازده رقم گندم نان در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار تحت دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان- خرم‌آباد، که دارای اقلیم گرم و خشک است، در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ مورد ارزیابی قرار گرفتند و سپس از شاخص‌های مختلف تحمل به تنش برای بررسی تحمل رقم‌های مورد مطالعه استفاده شد. همچنین، برای تشخیص بهترین شاخص از ضریب تبیین (مربع ضریب همبستگی، R^2) بین شاخص‌ها با عملکرد دانه تحت دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی استفاده و با روش بوت‌استرپ، حدود اطمینان ضریب تبیین شاخص‌های مرتبط با عملکرد تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی برآورد شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های تحمل به تنش تغییریافته تحت شرایط بدون تنش (K_1STI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) و متوسط بهره‌وری (MP) شاخص‌های اختصاصی شرایط بدون تنش و شاخص‌های تحمل به تنش تغییریافته تحت شرایط تنش (K_2STI) و حساسیت به خشکی (DI) شاخص‌های اختصاصی برای شرایط تنش خشکی بودند. شاخص میانگین هارمونیک (HM) نیز همبستگی نسبتاً پایداری با عملکرد دانه تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی داشت. در نهایت، بر اساس تمامی شاخص‌های اختصاصی و عمومی، رقم آفتاب برترین رقم در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی بود و رقم پوگاری نیز به‌عنوان متحمل‌ترین رقم برای شرایط تنش خشکی شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: ارقام متحمل، شاخص میانگین هارمونیک، ضریب تبیین، عملکرد دانه

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۲- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۳- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
* نویسنده مسئول: akbarpour.oa@lu.ac.ir

مقدمه

اصلاح برای تحمل به تنش خشکی همواره با مشکلات ویژه خود مواجه بوده است. از مهم‌ترین این مشکلات می‌توان به مواردی هم‌چون پیچیدگی صفت تحمل به تنش خشکی و عدم وجود معیارها و روش‌های موثر برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل اشاره کرد (Hall, 1993). اندازه‌گیری تحمل به خشکی را می‌توان با مقایسه عملکرد یک ژنوتیپ در شرایط بدون تنش با عملکرد همان ژنوتیپ در شرایط تنش خشکی اندازه‌گیری کرد. بلام (Blum, 1988) بیان داشت که مناسب‌ترین شیوه اندازه‌گیری حساسیت به تنش خشکی این است که میزان حساسیت به‌عنوان تابعی از کاهش عملکرد تحت شرایط تنش خشکی اندازه‌گیری شود. برای درک بهتر میزان تحمل به تنش، شاخص‌هایی برای غربالگری قابل اعتماد وجود دارد. به‌نژادگران از چندین شاخص پایداری عملکرد برای تشخیص ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به تنش خشکی استفاده می‌کنند (Fernandez *et al.*, 1989).

معیارهای انتخاب عمدتاً بر اساس انتخاب ژنوتیپ‌ها تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی پیشنهاد شده‌اند (Rosielle and Hamblin, 1981) که می‌توان به معیارهای تحمل (TOL = Tolerance Index)، متوسط بهره‌وری (MP = Mean Productivity) و حساسیت به تنش (SSI = Stress Susceptibility Index) اشاره کرد. فرناندز (Fernandez, 1992) بیان داشت که مناسب‌ترین معیار انتخاب برای تنش خشکی از میان شاخص‌های تحمل، معیاری است که قادر به تشخیص گروه A از سایر گروه‌های دیگر باشد. در این راستا برای شناسایی ارقام گروه A شاخص تحمل به تنش (Stress Tolerance Index) را ارایه کرد. مقدار بالای این شاخص برای یک ژنوتیپ نمایان‌گر تحمل به خشکی بهتر و عملکرد بالقوه بیش‌تر آن ژنوتیپ است (Fernandez, 1992). جهت تعیین میزان مقاومت ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی شاخص میانگین هندسی بهره‌وری (GMP = Geometric Mean Productivity) پیشنهاد شد. این شاخص قادر به تشخیص ژنوتیپ‌های گروه A از C است. علاوه بر GMP شاخص‌های TOL و MP نیز از جمله شاخص‌هایی هستند که توسط محققین برای شناسایی ژنوتیپ‌های محتمل گزارش شده‌اند (Zebarjadi, 2008; Kakaei *et al.*, 2012).

آنچه که مورد توافق است این است که معیار معتبری برای مقایسه شاخص‌ها و تعیین یک شاخص برتر وجود ندارد. اگرچه در بیش‌تر موارد، همبستگی مثبت شاخص‌ها با عملکرد در دو شرایط تنش خشکی و بدون تنش مورد علاقه محققین است (Sadeghzadeh Ahari, 2006; Kamrani *et al.*, 2015)، اما نباید این واقعیت را انکار کرد که به همان اندازه شاخص‌های دارای همبستگی مثبت با عملکرد در انتخاب شاخص‌ها و ژنوتیپ‌ها موثر هستند، به همان اندازه شاخص‌های دارای همبستگی منفی با عملکرد نیز در انتخاب ژنوتیپ‌ها موثر می‌باشند. به هر حال، در بیش‌تر موارد به اشتباه همبستگی مثبت شاخص‌ها با عملکرد تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی مورد توجه محققین قرار گرفته است.

برای بررسی ارتباط بین شاخص‌ها با عملکرد تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی عموماً از همبستگی ساده استفاده می‌شود. شاخص‌هایی که همبستگی منفی هر چند به مقدار ۱- با عملکرد تحت دو شرایط تنش و بدون تنش دارند، عموماً به‌عنوان شاخص‌های مطلوب معرفی نمی‌شوند (Shafazadeh *et al.*, 2004; Kamrani *et al.*, 2015; Rajaie *et al.* 2016). بنابراین برای انتخاب شاخص یا شاخص‌های برتر، روش بهتر این است که از R^2 یا مربع همبستگی‌ها استفاده شود. از طرفی آماره R^2 فقط یک کمیت است که فاقد خطای معیار است. چنانچه بخواهیم بین شاخص‌هایی که با عملکرد در شرایط بدون تنش و تنش خشکی رابطه دارند، بر اساس معیار R^2 انتخاب کنیم، صرفاً می‌توان از روی بزرگ و کوچک بودن این آماره، شاخص‌ها را مورد مقایسه قرار داد و تا کنون آزمون معتبری برای مقایسه و آزمون آماره R^2 شاخص‌ها ارایه نشده است.

در مواردی که توزیع داده‌ها مشخص نیست و داده‌ها مستقل از همدیگر هستند، محققین می‌توانند از روش‌های نمونه‌برداری (Sampling) یا بازنمونه‌گیری (Re-sampling) به‌منظور برآورد دقیق پارامترها و حدود اطمینان آن‌ها بر اساس توزیع‌های تجربی استفاده کنند. روش بوت‌استرپ (Bootstrap) و جک‌نایف (Jackknife) از جمله روش‌های پرکاربرد هستند که در گروه محاسبات ناپارامتری قرار دارند و برای برآورد خطای استاندارد و فاصله اطمینان به‌کار می‌روند (Efron and Tibshirani, 1998). از روش نمونه‌برداری جک‌نایف برای محاسبه خطای معیار پارامترهایی استفاده می‌شود که توزیع آن‌ها در دسترس نباشد و یا محاسبه خطای معیار مشکل می‌باشد. ژو و ویر (Zhu and Weir, 1996) با نمونه‌برداری بر اساس روش جک‌نایف، مولفه‌های واریانس طرح تلاقی دی‌الل،

همبستگی افزایشی و غالبیت و خطای استاندار مربوط به آن‌ها را برآورد کردند. این تجزیه‌ها با استفاده از نرم‌افزار QGAStation (Chen and Zhu, 2003) انجام شد. یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2009) نیز با کمک نمونه‌برداری به روش بوت‌استرپ ،حدود اطمینان مربوط به ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها را در بررسی داده‌های مربوط به چند مکان و چند ژنوتیپ مورد مطالعه قرار دادند و بخش‌بندی گرافیکی به روش نرم‌افزار بای‌پلات را روش غیرتکرارپذیری بیان کردند.

هدف از این تحقیق، تعیین برترین و پایدارترین شاخص یا شاخص‌های تحمل به خشکی برای انتخاب متحمل‌ترین ارقام گندم با استفاده از روش نمونه‌برداری بوت‌استرپ مقادیر R^2 هر یک از شاخص‌ها با عملکرد تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی بود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی مورد مطالعه در این تحقیق، یازده رقم گندم شامل سرداری، آذر۲، باران، کریم، آفتاب، قابوس، کوهدشت، چمران۲، کراس رصد، اوحدی و پوگاری بود که به‌منظور ارزیابی تحمل به تنش خشکی، در قالب دو آزمایش جداگانه تحت دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی مورد مطالعه قرار گرفتند. این ارقام عموماً توسط کشاورزان استان لرستان مورد کشت و کار قرار می‌گیرند و به استثنا رقم سرداری که یک رقم قدیمی و بومی منطقه بوده و در این تحقیق به‌عنوان رقم شاهد از آن استفاده شده است، سایر ارقام، ارقام آزاد شده‌ای هستند که در سال‌های اخیر توسط مرکز تحقیقات کشاورزی استان لرستان به کشاورزان منطقه معرفی شده‌اند. آزمایش در هر دو شرایط در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد که آزمایش اول در شرایط بدون تنش و همراه با آبیاری و آزمایش دوم در شرایط تنش خشکی و بدون هیچ‌گونه آبیاری انجام شد. هر دو آزمایش در سال ۹۶-۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان- خرم‌آباد، با اقلیم گرم و خشک، با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳ دقیقه و ارتفاع ۱۱۱۷ متر از سطح دریا اجرا شد. عملکرد این ارقام به صورت تن در هکتار مورد یادداشت‌برداری قرار گرفت و سپس شاخص‌های تحمل به تنش بر اساس روابط زیر برآورد شدند:

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

$$SSI = \frac{1 - Y_S / Y_P}{SI} \quad (۱)$$

که در آن، شاخص تنش (SI=Stress Index) از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$SI = 1 - \frac{\overline{Y}_S}{\overline{Y}_P} = \frac{\overline{Y}_P - \overline{Y}_S}{\overline{Y}_P} \quad (۲)$$

۲- میانگین هارمونیک (Kristin *et al.*, 1997):

$$HM = \frac{2(Y_P \times Y_S)}{Y_P + Y_S} \quad (۳)$$

۳- شاخص متوسط بهره‌وری (Rosielle and Hamblin, 1981):

$$MP = \frac{Y_P + Y_S}{2} \quad (۴)$$

۴- شاخص تحمل (Rosielle and Hamblin, 1981):

$$TOL = Y_P - Y_S \quad (۵)$$

۵- شاخص تحمل به تنش خشکی (Fernandez, 1992):

$$STI = \frac{Y_P \times Y_S}{(\overline{Y}_P)^2} \quad (۶)$$

۶- میانگین هندسی بهره‌وری (Fernandez, 1992):

$$GMP = \sqrt{Y_P \times Y_S} \quad (۷)$$

۷- شاخص حساسیت به خشکی (Blum, 1988):

$$DI = \frac{Y_S^2}{Y_P \times \overline{Y}_S} \quad (۸)$$

۸- شاخص تحمل به تنش تغییریافته (Farshadfar and Sutka, 2002): این شاخص (K_iSTI) به‌ترتیب برای شرایط بدون تنش (K_1STI) و تنش خشکی (K_2STI) با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه شد:

$$K_1STI = \frac{Y_P^2}{\overline{Y}_P^2} \quad (۹)$$

$$K_2STI = \frac{Y_S^2}{\overline{Y}_S^2} \quad (۱۰)$$

در این روابط، Y_P و Y_S به‌ترتیب متوسط عملکرد هر ژنوتیپ تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی و $\overline{Y}_P$ و $\overline{Y}_S$ به‌ترتیب متوسط عملکرد تمامی ژنوتیپ‌ها تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی هستند. پس از محاسبه شاخص‌ها، از آنجایی که متغیر R^2 به‌طور مستقیم از خروجی رگرسیون حاصل می‌شود، ابتدا متغیرهای Y_P و Y_S به‌عنوان متغیرهای وابسته و پس از آن سایر شاخص‌ها

به‌طور جداگانه به‌عنوان متغیرهای مستقل وارد مدل رگرسیون خطی شدند. برای محاسبه حدود اطمینان آماره R^2 لازم شد که عمل نمونه‌گیری انجام شود. برای نمونه‌برداری با جایگزینی (Sampling with replacement)، ابتدا از میانگین ۱۱ ژنوتیپ مورد مطالعه به‌طور تصادفی نمونه‌برداری شد و برای هر نمونه شاخص‌ها محاسبه و رگرسیون انجام گرفت و مقدار R^2 در هر بار ذخیره شد. این عمل با استفاده از رویه Surveyselect در نرم‌افزار SAS انجام گرفت (Cassell 2007). برای انجام بوت‌استرپ، مفروضات مستقل بودن میانگین ژنوتیپ‌ها از هم‌دیگر و نیز تقریب نرمال بودن توزیع پارامتر R^2 در نظر گرفته شد.

برای انجام بوت‌استرپ، روش نمونه‌برداری به‌صورت URS (Unrestricted Random Sampling) انجام شد، یعنی نمونه‌برداری تصادفی محدود نشده که همه مشاهدات برای انتخاب شدن دارای احتمال یکسان بودند. تعداد انتخاب تصادفی ۱۰۰۰ بار تعیین شد. میزان Samrate برابر با یک گرفته شد. این به معنای نسبت مشاهدات انتخاب شده در هر نمونه نسبت به داده اولیه بود. بنابراین، تعداد داده‌های خروجی برابر با ۱۰۰۰ داده ۱۱ تایی و در مجموع ۱۱۰۰۰ داده بودند. از سه روش برای محاسبه خطای استاندارد و حدود اطمینان R^2 استفاده شد. روش اول برآورد حدود اطمینان بر اساس توزیع نرمال، روش دوم بر اساس صدک‌های احتمال و روش سوم بر اساس صدک‌های احتمال تصحیح شده بود.

برآورد حدود اطمینان با توزیع نرمال: در این روش فرض می‌شود که R^2 از توزیع t تبعیت می‌کند و در اطراف میانگین، متقارن است. بنابراین، حدود اطمینان ۹۵ درصد میانگین R^2 بر اساس توزیع t با ۹۹۹ درجه آزادی برآورد شد (رابطه ۱۱). در این روش، ابتدا مقدار t محاسبه و در انحراف معیار R^2 که از ۱۰۰۰ نمونه به‌دست آمد (رابطه ۱۲)، ضرب شد. برای محاسبه مقدار اریب R^2 برآورد شده از ۱۰۰۰ نمونه، میانگین آن‌ها با R^2 برآورد شده از داده‌های اصلی مقایسه شد (رابطه ۱۳):

$$\begin{cases} U_{R_b^2} \\ L_{R_b^2} \end{cases} = \overline{R}_b^2 \pm t_{\alpha/2} \times S_{R_b^2} \qquad (۱۱)$$

$$S_{R_b^2} = \sqrt{\frac{\sum_1^{1000}\left(R_i^2 - \overline{R}_b^2\right)}{999}} \qquad (۱۲)$$

$$\text{Bias} = \overline{R}_b^2 - R_{\text{initial}}^2 \qquad (۱۳)$$

در این روابط، $S_{R_b^2}$ اشتباه استاندارد، $\overline{R}_b^2$ میانگین ضرایب تبیین همه نمونه‌های بوت‌استرپ، $U_{R_b^2}$ حد بالا در سطح احتمال $\alpha/2$، $L_{R_b^2}$ حد پایین در سطح احتمال $\alpha/2$، R_{initial}^2 مقدار R^2 داده‌های اولیه و Bias مقدار اریب برآورد است.

برآورد حدود اطمینان به‌روش صدک‌ها: در این روش، حدود اطمینان ۹۵ درصد R^2 با توجه به صدک ۲/۵ و ۹۷/۵ R^2 های تولید شده محاسبه شد (رابطه ۱۴). این روش مزیت‌هایی نسبت به روش قبلی که مبتنی بر توزیع نرمال بود، دارد. به‌عنوان مثال، برآورد فاصله اطمینان R^2 در این روش لزوماً به‌صورت متقارن نیست و تحت تاثیر توزیع مفروض شده t قرار نمی‌گیرد. برای محاسبه این صدک‌ها از فرمان Univariate در نرم‌افزار SAS استفاده شد.

$$P_1 = \text{Percentail}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times 100\left[R_i^2\right] \qquad (۱۴)$$
$$P_2 = \text{Percentail}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \times 100\left[R_i^2\right]$$

که در آن، P_1 صدک پایین و P_2 صدک بالای حدود اطمینان تعداد R^2های حاصل از بوت‌استرپ است.

برآورد حدود اطمینان به‌روش تصحیح اریبی برآوردها یا صدک‌های احتمال تصحیح: در این روش می‌توان برآورد حدود اطمینان پارامتر را بر اساس مقدار اریبی تصحیح کرد. مقدار R^2 حاصل از داده‌های اولیه می‌تواند به‌عنوان R^2 برآورد شده نااریب در نظر گرفته شود. در صورت نیاز می‌توان حدود اطمینان را بر اساس اریب به‌روش کامرون و تری‌ودی (Cameron and Trivedi, 2009) نیز تصحیح کرد. در این روش ابتدا نسبت R^2های حاصل از بوت‌استرپ که از مقدار R^2 اولیه کم‌تر هستند، محاسبه می‌شوند (رابطه ۱۵). سپس صدک محاسبه شده که در روش دوم بیان شد، بر اساس اختلاف این نسبت محاسبه شده از ۰/۵ تصحیح می‌شود. ابتدا پارامتر Z مربوط به نسبت مشاهده شده و نیز پارامتر یک سطح احتمال مورد نظر مثلاً ۰/۰۵ محاسبه می‌شوند. سپس برای محاسبه حدود اطمینان، ابتدا دو برابر مقدار پارامتر Z مربوط به نسبت مشاهده شده، بعلاوه و منهای پارامتر Z در سطح احتمال مد نظر می‌شوند. سطح احتمال مربوط به مقادیر Z تصحیح شده به‌عنوان صدک تصحیح شده برای حدود اطمینان R^2 در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۱۶):

$$\text{Ratio} = \frac{\text{number}\left(R_b^2 < R_{initial}^2\right)}{\text{number}\left(R_b^2\right)} \quad (۱۵)$$

$$P_1 = \Pr\left(2 \times Z_{ratio} - Z_{\alpha/2}\right)$$
$$P_2 = \Pr\left(2 \times Z_{ratio} + Z_{\alpha/2}\right) \quad (۱۶)$$

که P_1 صدک تصحیح شده پایین و P_2 صدک تصحیح شده بالای حدود اطمینان تعداد R^2های حاصل از بوتاسترپ است. برای انجام کلیه تجزیه‌ها از نرم‌افزار SAS استفاده شد (Cramer *et al.*, 1999; Cassell, 2007).

نتایج و بحث

نتایج مربوط به شاخص‌های تحمل در جدول ۱ ارایه شده است. این نتایج با استفاده از برنامه SAS محاسبه شدند. جهت سهولت دسترسی محققین به برنامه‌های مختلف استفاده شده در این تحقیق، برنامه محاسبه شاخص‌ها و نیز برنامه بوتاسترپ برای برآورد حدود اطمینان R^2 به سه روش مختلف در نرم‌افزار SAS در انتهای این مقاله ارایه شده است. در این تحقیق سعی شد تمامی شاخص‌های تحمل به تنش ارایه شوند. اگرچه در مرور منابع، شاخص‌های دیگری نیز مشاهده شدند، ولی به‌دلیل مشابهت با برخی از شاخص‌هایی که در این تحقیق ارایه شده‌اند، از محاسبه و تحلیل آن‌ها صرف‌نظر شد. برای مثال، شاخص‌های RDI (Relative Drought Index) یا SDI (Sensitivity Drought Index) شاخص‌هایی هستند که در منابع از آن‌ها استفاده شده است (Ali and El-Sadek, 2016)، اما این شاخص‌ها ۱۰۰ درصد مشابه شاخص SSI هستند.

شدت تنش (SI) که مقدار آن بین صفر تا یک است و مقادیر بزرگ‌تر آن نشان‌دهنده شدت بیش‌تر تنش خشکی است، در این تحقیق ۰/۳۲ بود، به این معنی که شدت تنش خشکی اعمال شده در این تحقیق در دامنه متوسطی قرار داشت. مقدم و همکاران (Moghadam *et al.*, 2012) نیز با مطالعه تنش خشکی در یونجه طی دو سال، شدت تنش در سال اول را بالا (۴۸-۳۵ درصد) و در سال دوم پایین (۲۵-۱۴ درصد) گزارش کردند. به‌طور کلی در تمامی شاخص‌های مورد مطالعه (جدول ۱)، به استثنای دو شاخص SSI و TOL، هر قدر میزان این شاخص‌ها بیش‌تر باشد، قابلیت انتخاب ژنوتیپ برای شرایط بدون تنش و تنش خشکی بیش‌تر می‌شود، در حالی‌که در شاخص‌های SSI و TOL هر قدر میزان این دو شاخص کم‌تر باشد، قابلیت انتخاب ژنوتیپ تحت شرایط تنش خشکی افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به شاخص‌های ارزیابی شده، رقم آفتاب بالاترین مقدار را برای شاخص‌های Y_P، STI، MP، GMP، HM و K_1STI داشت و به‌عنوان برترین ژنوتیپ از نظر شاخص‌های ارزیابی شده بر اساس عملکرد دانه بود. از نظر شاخص‌های Y_S و K_1STI رقم پوگاری با بالاترین مقدار به‌عنوان برترین ژنوتیپ بود. رقم کوهدشت نیز با بالاترین مقدار برای شاخص DI و کم‌ترین مقادیر برای شاخص‌های TOL و SSI به‌عنوان برترین ژنوتیپ از نظر این سه شاخص شناخته شد (جدول ۱).

همبستگی بین شاخص‌ها در جدول ۲ ارایه شده است. بین عملکرد تحت شرایط تنش (Y_S) و عملکرد تحت شرایط بدون تنش (Y_P) همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد وجود داشت. همچنین، شاخص Y_P با تمامی شاخص‌ها به استثنای SSI و DI همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. شاخص Y_S نیز با تمامی شاخص‌ها به غیر از سه شاخص SSI، TOL و K_1STI همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد نشان داد (جدول ۲). از آنجایی که تمامی همبستگی‌های بین شاخص‌ها با عملکرد تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی‌دار بودند، از این‌رو مقایسه و انتخاب شاخص‌ها بر اساس همبستگی‌های معنی‌دار تا حدودی مشکل می‌باشد. بنابراین، ابتدا از آماره R^2 به‌عنوان ضریب تبیین بین شاخص‌ها استفاده شد. این آماره از جهت یکنواخت‌سازی ضرایب ارتباط، نسبت به همبستگی بهتر است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، شاخص‌هایی که همبستگی منفی هر چند نزدیک به ۱- با عملکرد در دو شرایط آزمایش داشته باشند، به‌عنوان شاخص‌های مطلوب معرفی نمی‌شوند (Shafazadeh *et al.*, 2004; Kamrani *et al.*, 2015; Rajaie *et al.*, 2016). اگرچه شاخص‌هایی که ضریب همبستگی منفی داشته باشند، می‌توانند گروه‌بندی خوبی از ژنوتیپ‌ها ارایه دهند. بنابراین برای انتخاب شاخص یا شاخص‌های برتر، بهتر این است از R^2 یا مربع همبستگی‌ها استفاده شود.

جدول ۱- برآورد شاخص‌های تحمل بر اساس عملکرد دانه یازده رقم گندم تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی

Table 1. Estimation of tolerance indices for grain yield of 11 wheat cultivars under non-stress and drought stress conditions

Genotype	Characteristic	Y_P	Y_S	SSI	STI	TOL	DI	MP	GMP	HM	K_1STI	K_2STI
AFtab	THELIN/3/BABAX/LR42//BABAX/4/BABAX/LR42//BABAX	5098	2573	1.547	1.164	2524.81	0.569	3835.21	3621.49	3419.67	2.684	1.479
Azar2	Kvz/YM71/3/Maya"S"//Bb/Iina//Sardari	4025	2503	1.181	0.894	1521.29	0.682	3263.95	3174.08	3086.68	1.285	1.076
Auhadi	Line Gene Bank 14 (KC- 2758)	3099	1847	1.262	0.508	1252.68	0.482	2472.97	2392.33	2314.33	0.433	0.333
Baran	PTZ NISKA/UT1556-170//UNKNOWN TCI97AP	3450	2038	1.278	0.624	1411.91	0.527	2743.55	2651.17	2561.9	0.659	0.497
Chamran2	Attila 50y//Attila/Bacanora	2076	1219	1.29	0.225	857.31	0.314	1647.82	1591.09	1536.31	0.086	0.064
Cross Rasad	Rasad// Shahi/PrL"S"	2903	2455	0.482	0.633	448	0.91	2679.09	2669.71	2660.36	0.473	0.732
Ghabus	KAUZ/PASTOR//BAV92/RAYON CMSS00M02400S-030M-030WGY-030M-9M-0Y	4477	2699	1.241	1.072	1778.31	0.713	3587.75	3475.82	3367.39	1.907	1.499
Karim	HAMAM-4:T.AEST/SPRW'S' //CA8055/3/BACANORA86ICW92-0477-1AP-1AP-4AP-1AP-0AP	3531	2864	0.59	0.898	667.41	1.018	3197.70	3180.24	3162.87	0.993	1.414
Kohdasht	29R-1R-1R-6R-0R-Tr 8010200	2254	2538	-0.394	0.508	-284.02	1.252	2395.78	2391.57	2387.36	0.229	0.628
Pougari	Local Genotype	3669	3175	0.42	1.034	493.73	1.204	3422.07	3413.16	3404.26	1.235	2.001
Sardari	Old Cultivar	2343	1193	1.533	0.248	1150.28	0.266	1767.81	1671.64	1580.69	0.121	0.068

Y_P, yield under non-stress condition; Y_S, yield under drought condition; SSI, stress susceptibility index; STI, stress tolerance index; Tol, tolerance index; DI, drought resistance index; MP, mean productivity; GMP, geometric mean productivity; HM, harmonic mean; K_iSTI, modified stress tolerance index.

جدول ۲- ضریب همبستگی بین شاخص‌های تحمل به تنش در ۱۱ رقم گندم مورد مطالعه

Table 2. Correlation coefficients among tolerance indices in the 11 studied wheat varieties

index	Y_P	Y_S	SSI	STI	TOL	DI	MP	GMP	HM	K_1STI
Y_S	0.61*									
SSI	0.34ns	-0.51ns								
STI	0.92**	0.86**	-0.02ns							
TOL	0.74**	-0.08ns	0.86**	0.43ns						
DI	0.08ns	0.83**	-0.90**	0.44ns	-0.60*					
MP	0.93**	0.85**	-0.01ns	0.99**	0.45ns	0.43ns				
GMP	0.90**	0.89**	-0.08ns	0.99**	0.38ns	0.49ns	1.00**			
HM	0.87**	0.92**	-0.15ns	0.99**	0.31ns	0.55ns	0.99**	1.00**		
K_1STI	0.97**	0.59ns	0.28ns	0.91**	0.71*	0.11ns	0.91**	0.87**	0.83**	
K_2STI	0.75**	0.91**	-0.22ns	0.94**	0.17ns	0.62*	0.91**	0.93**	0.94**	0.77**

ns, * and **: Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

ضرایب تبیین (آماره R^2) بین شاخص‌های مورد مطالعه با عملکرد تحت شرایط بدون تنش در جدول ۳ ارایه شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار R^2 و$\widehat{R}^2$ برآورد شده به‌ترتیب مربوط به شاخص‌های K_1STI و DI بود (جدول ۳). بیش‌ترین مقدار اریب مربوط به برآورد $\widehat{R}^2$ به‌ترتیب مربوط به DI و SSI بود. خطای استاندارد پارامترهای برآورد شده به‌روش بوت‌استرپ نیز نشان داد که بیش‌ترین خطای استاندارد مربوط به شاخص‌های TOL، SSI، DI و K_2STI است. میزان اریب بودن برآوردها و یا بالا بودن خطای استاندارد در واقع میزان ناپایداری شاخص را نشان می‌دهد و هر مقدار این دو معیار بیش‌تر باشند، بیانگر متفاوت بودن شاخص‌ها در نمونه‌برداری‌های مختلف است. در تحقیق سدریدس و همکاران (Sideridis *et al.*, 2010) بیان داشتند که میزان اریب بودن برآوردها و بالا بودن خطای استاندارد به توزیع نمونه‌های حاصل از بوت‌استرپ مربوط است. چنانچه اندازه جمعیت و نمونه‌ها کوچک باشد، توزیع پارامتر نمونه‌ها دارای چولگی بیش‌تر شده و از توزیع نرمال خارج می‌شوند و در نتیجه مقدار اریب و خطای استاندارد افزایش می‌یابد. بنابراین، بهتر است از روش‌های دوم و سوم برای حدود اطمینان $\widehat{R}^2$ استفاده شود.

در بررسی اولیه این نکته به‌دست می‌آید که هر شاخصی که در دو ویژگی اریب و خطای استاندارد بالاتر باشد، شاخص ناپایداری است و برای انتخاب ژنوتیپ‌ها از یک گروه به گروه دیگر متفاوت می‌باشد، اما باید به این نکته توجه داشت که اگر عملکرد در شرایط تنش خشکی در برخی از ژنوتیپ‌ها بیش‌تر از عملکرد در شرایط بدون تنش باشد، برخی شاخص‌ها به‌صورت منفی برآورد می‌شوند و در نتیجه رتبه عملکرد در دو شرایط بدون تنش یا تنش خشکی با رتبه شاخص یکسان نخواهند بود و چون نمونه‌ها کوچک هستند، از این‌رو یک مشاهده نیز تاثیر زیادی بر همبستگی خواهد داشت. بنابراین، همبستگی‌ها از نمونه‌ای به نمونه دیگر بسیار ناپایدار می‌باشند. در کل نتایج جدول ۳ نشان داد که شاخص K_1STI کم‌ترین میزان اریب از R^2 اولیه و نیز کم‌ترین میزان خطای استاندارد را با Y_P داشت. بنابراین این شاخص از نظر همبستگی با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش شاخص پایدارتری نسبت به سایر شاخص‌ها بود.

محاسبه حدود اطمینان R^2 برای شاخص‌های مختلف نسبت به متغیر Y_P به سه روش ارایه‌شده نیز تا حدودی با نتایج دو شاخص اریب و خطای استاندارد در توافق بودند (جدول ۳)، به‌طوری‌که بیش‌ترین بازه اطمینان ۹۵ درصد در شاخص‌های SSI و TOL مشاهده شد. این نتایج با معنی‌دار بودن ضرایب همبستگی (جدول ۲) در توافق بودند، به این ترتیب که اگر همبستگی بین شاخص‌ها با عملکرد تحت شرایط بدون تنش معنی‌دار نبود، حدود اطمینان R^2 نیز با صفر اختلاف نداشت و صفر در بازه اطمینان وجود داشت و به بیان دیگر حدود اطمینان بالا و پایین R^2 علامت یکسانی نداشتند (جدول ۳). در روش اول محاسبه حدود اطمینان R^2 شاخص SSI با Y_P بازه حدود ۷۵ درصد و شاخص TOL بازه حدود ۸۵ درصد را در بر گرفتند که نشان‌دهنده تنوع و ناپایداری ارتباط این شاخص‌ها با عملکرد دانه در نمونه‌برداری‌های مختلف بود. چن و همکاران (Chen *et al.*, 2017) نیز بیان داشتند که ناپایداری روابط در نمونه‌های حاصل از بوت‌استرپ در جمعیت‌های کوچک باعث افزایش حدود اطمینان و اریب

پارامترهای حاصل از بوت‌استرپ می‌شود. اگرچه در روش‌های دوم و سوم به‌ترتیب از روش محاسبه صدک و صدک تغیر یافته استفاده شده است، ولی حدود اطمینان R^2 در شاخص‌های SSI و TOL تغییر چندانی نسبت به روش اول نداشتند و ناپایداری ارتباط با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش، در بازه اطمینان روش‌های دوم و سوم نیز نشان داده شد. شاخص‌های K_1STI، MP، GMP و HM به‌ترتیب دارای کم‌ترین بازه در هر سه روش محاسبه حدود اطمینان برای شاخص R^2 بودند و نشان‌دهنده پایداری این شاخص‌ها در نمونه‌برداری‌های مختلف برای ارتباط با Y_P بود (جدول ۳). بیش‌تر محققین صرفاً به معنی‌دار بودن همبستگی بین شاخص‌ها با عملکرد بسنده کرده و کمیت و کیفیت این ارتباط مد نظر آنها نبوده است (Zebarjadi, 2008; Kakaei *et al.*, 2012).

ضرایب تبیین (R^2) بین شاخص‌های مورد مطالعه با عملکرد تحت شرایط تنش خشکی در جدول ۴ ارایه شده است. بیش‌ترین میزان R^2 به‌ترتیب مربوط به K_2STI، HM، MP و DI بود. کم‌ترین بازه R^2 نیز به‌ترتیب مربوط به شاخص‌های K_2STI، HM و DI بود که نشان‌دهنده پایداری همبستگی بین این شاخص‌ها با عملکرد تحت شرایط تنش خشکی بود. آماره R^2 بین Y_P و Y_S حدود ۰/۳۶۹ بود و آماره $\widehat{R}^2$ نیز ۰/۳۸۲ برآورد شد. حدود اطمینان این آماره در روش اول نشان داد که R^2 با صفر اختلاف ندارد، اما در روش‌های دوم و سوم آماره R^2 با صفر اختلاف معنی‌داری نشان داد که با معنی‌داری ضریب همبستگی بین Y_P و Y_S در تطابق بود. وجود رفتار متفاوت ژنوتیپ در محیط، یکی از دلایل کاهش همبستگی عملکرد دانه در دو محیط متفاوت می‌باشد (Ismaili *et al.*, 2016). این بدین معناست که اگر روند عملکرد ژنوتیپ‌ها در دو شرایط یکسان باشد، همبستگی عملکرد ژنوتیپ‌ها در دو محیط نیز به ۱+ نزدیک می‌شود.

وجود رفتار متفاوت ژنوتیپ‌ها در دو شرایط محیطی باعث شده است که شاخص‌های Y_P و Y_S یا عملکرد ژنوتیپ‌ها در دو شرایط، همبستگی بالایی با هم نداشته باشند (Yang, 2002). از طرفی شاخص‌های مختلف نیز با عملکرد همبستگی متفاوتی داشتند. بنابراین انتخاب ژنوتیپ‌ها بر مبنای شاخص‌های تحمل، از شرایطی به شرایط دیگر متفاوت می‌باشد. به‌طور کلی، انتخاب شاخص‌ها عمدتاً بر مبنای میزان همبستگی آن‌ها با عملکرد در شرایط بدون تنش و تنش خشکی انجام گرفته است. با وجود اینکه همبستگی قابل آزمون است، اما انتخاب شاخص‌های مختلف که مقادیر همبستگی مشابه و معنی‌داری دارند، مشکل و در نتیجه انتخاب بهترین شاخص یا شاخص‌ها تا حدودی مشکل است. در مقابل، روش بوت‌استرپ که یک روش مبتنی بر نمونه‌برداری کامپیوتری است، می‌تواند انتخاب شاخص‌های مرتبط با عملکرد را ساده‌تر کند. این روش، روش ساده‌ای است که به پیش‌فرض‌هایی مانند وجود یک توزیع آماری و یا تعداد داده مناسب نیاز ندارد. اگرچه این روش در مواردی مانند وجود داده‌های گم شده و یا داده‌های پرت نتایج مناسبی ارایه نمی‌دهد (Good, 2006).

یکی از نکاتی که همواره در استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش خشکی مورد تاکید محققین بوده است، استفاده از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی و ترسیم بای‌پلات در تحلیل و گروه‌بندی شاخص‌های تحمل است (Mohammadi *et al.*, 2011; Khayatnezhad *et al.*, 2011; Khodarahmpour *et al.*, 2011). به نظر می‌رسد این فرایند دارای اشکالاتی است که کم‌تر توسط محققین بررسی شده است. اول اینکه همه شاخص‌های تحمل به‌طور مستقیم از روابط خطی و غیرخطی دو متغیر Y_P و Y_S حاصل می‌شوند. بنابراین، بیش‌تر شاخص‌ها، به‌صورت ساختاری و طبیعی دارای ارتباط خطی با همدیگر می‌شوند. این ارتباط خطی و یا همبستگی بین شاخص‌ها، ناشی از کنترل ژنتیکی یا آثار پلیوتروپی ژن‌ها و یا عامل مشترک برای صفات نیست، بلکه صرفاً ارتباط خطی ریاضی بین شاخص‌ها است. بنابراین، محققین ابتدا چندین شاخص از دو متغیر Y_P و Y_S استخراج می‌کنند و در حقیقت ابعاد داده‌ها را افزایش می‌دهند و سپس این شاخص‌ها را با روش تجزیه به مولفه‌های اصلی در جهت کاهش ابعاد داده‌ها تحلیل می‌کنند (Rencher, 2003). این عمل صرفاً می‌تواند تفسیر داده را با پیچیدگی بیش‌تری روبرو کند و فقط حجم تجزیه‌های اماری را بیش‌تر کند. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، همبستگی بالایی بین شاخص‌های محاسبه شده وجود دارد. در برخی مواقع حذف متغیرهایی که همبستگی خیلی بالایی دارند، تاثیری بر نتیجه تجزیه به مولفه‌های اصلی هم نمی‌گذارد (Guyon and Elisseeff, 2003). از آنجایی که همه شاخص‌ها همبستگی خیلی بالایی با هم داشتند، بنابراین ماندن این متغیرها در تجزیه به مولفه‌های اصلی صرفاً باعث افزایش اطلاعات غیرمفیدی می‌شود که با متغیرهای کم‌تری می‌توان همان اطلاعات را دریافت کرد (Jolliffe, 1973).

تجزیه به مولفه‌های اصلی در حقیقت یک روش کاهش ابعاد داده از p بعد به m بعد است (m<p):

$$Z_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + \cdots + a_{ip}x_p, \qquad i = 1\ to\ m$$

هر متغیر جدید در تجزیه به مولفه‌های اصلی یک ترکیب خطی از تمامی شاخص‌های تحمل است. هر شاخص تحمل نیز به تنهایی ترکیبی خطی و غیرخطی از دو متغیر Y_P و Y_S است. در نهایت، هر متغیر جدید از تجزیه به مولفه‌های اصلی ترکیب پیچیده‌تر خطی و غیرخطی از Y_P و Y_S است که به‌نظر نمی‌رسد برای انتخاب یک شاخص این همه پیچیدگی لازم باشد. بنابراین،، به‌نظر می‌رسد که روش ترسیم نمودار دووجهی Y_P در مقابل Y_S که توسط فرناندز (Fernandez, 1992) ارایه شد، در واقع روش مناسب‌تری برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل نسبت به تجزیه به مولفه‌های اصلی و یا بای‌پلات برای انتخاب شاخص‌های تحمل و ژنوتیپ‌ها باشد. این نکته قابل اهمیت است که در بررسی شاخص‌های تحمل به تنش، تعریف یک شاخص از متغیرهای اولیه Y_p و Y_s به معنای انتخاب یک ژنوتیپ بر مبنای یک متغیر خلاصه‌سازی شده از دو متغیر اولیه است. یعنی ماهیت شاخص‌سازی، به خودی خود معادل با کاهش ابعاد داده است و حاصل آن یک متغیر جدید است که به محقق در انتخاب و مشاهده نتایج کمک می‌کند. بنابراین، وقتی که خلاصه‌سازی انجام می‌گیرد، تعریف متغیر یا متغیرهای جدید از متغیرهای خلاصه‌سازی شده یا شاخص‌ها با کمک تجزیه به مولفه‌های اصلی، دوباره‌کاری و افزایش حجم اطلاعات غیرمفید است و محقق را دچار سردرگمی بیش‌تر می‌کند.

زمانی که عملکرد تعدادی از ژنوتیپ‌ها تحت شرایط تنش خشکی بیش‌تر از شرایط بدون تنش است، استفاده از روش همبستگی بین شاخص‌ها با عملکرد در شرایط تنش خشکی و بدون تنش باید با احتیاط انجام گیرد، زیرا یک شاخص ممکن است گروه‌بندی خوبی از ژنوتیپ‌ها برای تحمل به تنش خشکی داشته باشد، اما در هنگام انتخاب بر اساس همبستگی مثبت بین آن‌ها با عملکرد در رشرایط بدون تنش و تنش خشکی شاخص دیگری انتخاب شود. به‌عنوان مثال، شاخص TOL ممکن است گروه‌بندی خوبی از ژنوتیپ‌ها انجام دهد، اما هر قدر میزان این شاخص کم‌تر باشد، تحمل ژنوتیپ بالاتر است که بیانگر رابطه منفی با Y_P و Y_S می‌باشد. همچنین، در مواقعی که همبستگی معنی‌دار بین شاخص‌های تحمل با عملکرد در دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی وجود دارد، بهتر است شاخصی انتخاب شود که پایداری همبستگی آن بالا باشد. این موضوع را می‌توان با استفاده از R^2 رگرسیون تشخیص داد و از یک آزمون مانند بوت‌استرپ برای بررسی حدود اطمینان شاخص R^2 استفاده کرد.

در تحقیق حاضر، ارقام آفتاب و پوگاری بر اساس شاخص‌های Y_P، STI، MP، GMP، HM و K_1STI و رقم کوهدشت با استفاده از شاخص‌های DI، STI و TOL برترین ارقام بودند. همچنین، با بررسی R^2 به‌روش رگرسیونی برای بررسی چگونگی ارتباط شاخص‌های تحمل با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش، شاخص‌های K_1STI، MP، GMP و HM به‌ترتیب دارای کم‌ترین بازه اطمینان در هر سه روش محاسبه حدود اطمینان برای پارامتر R^2 بودند و در نتیجه برترین شاخص‌ها برای انتخاب ژنوتیپ‌ها تحت شرایط بدون تنش بودند. تحت شرایط تنش خشکی نیز بیش‌ترین میزان R^2 به‌ترتیب مربوط به K_2STI ، HM، MP و DI بود و کم‌رین بازه اطمینان R^2 نیز به‌ترتیب برای شاخص‌های K_2STI، HM و DI به‌دست آمد که حاکی از همبستگی پایدار این شاخص‌ها با عملکرد تحت شرایط تنش خشکی بود. در واقع، شاخص‌های K_1STI، GMP و MP، شاخص‌های اختصاصی شرایط بدون تنش بودند که عمدتاً تحت تاثیر Y_P قرار گرفتند. بنابراین، می‌توان رقم آفتاب و پوگاری را با استفاده از این شاخص‌ها به‌عنوان ارقام برتر تحت شرایط بدون تنش پیشنهاد کرد. همچنین، شاخص‌های K_2STI و DI شاخص‌های اختصاصی برای شرایط تنش خشکی بودند. بر اساس شاخص K_2STI رقم پوگاری و بر اساس شاخص DI رقم کوهدشت برترین بودند. شاخص HM نیز در هر دو شرایط همبستگی نسبتاً پایداری با عملکرد تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی (Y_P و Y_S) داشت. بر اساس این شاخص عمومی نیز ارقام آفتاب و پوگاری برترین عملکرد را داشتند. در نهایت، بر اساس تمامی شاخص‌های اختصاصی و عمومی مطالعه شده در این تحقیق، رقم آفتاب به‌عنوان برترین رقم تحت شرایط بدون تنش و رقم پوگاری به‌عنوان پایدارترین رقم تحت شرایط تنش خشکی شناسایی شد.

جدول ۳- ارتباط بین شاخص‌های تحمل به تنش و عملکرد دانه گندم تحت شرایط بدون تنش (Y_P)

Table 3. Relationships between tolerance indices and wheat grain yield under non-stress conditions (Y_P)

Index	R†	R^2	$\widehat{R}^2$	Bias	Standard error	Confidence interval††					
						Method 1		Method 2		Method 3	
						Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
SSI	0.34	0.112	0.188	0.076	0.198	-0.276	0.501	0.000	0.759	0.000	0.678
STI	0.92	0.850	0.847	-0.002	0.073	0.706	0.994	0.664	0.956	0.603	0.940
TOL	0.74	0.548	0.533	-0.015	0.218	0.121	0.976	0.043	0.904	0.033	0.868
DI	0.08	0.007	0.127	0.120	0.161	-0.309	0.322	0.000	0.591	0.000	0.078
MP	0.93	0.874	0.876	0.002	0.056	0.763	0.984	0.742	0.963	0.666	0.950
GMP	0.90	0.816	0.822	0.006	0.071	0.676	0.956	0.655	0.940	0.596	0.917
HM	0.87	0.749	0.760	0.010	0.088	0.576	0.922	0.566	0.915	0.481	0.893
K_1STI	0.97	0.933	0.933	0.000	0.033	0.867	0.998	0.852	0.980	0.815	0.974
K_2STI	0.75	0.568	0.596	0.028	0.149	0.276	0.861	0.290	0.885	0.222	0.821

† R, R^2 and $\widehat{R}^2$ are correlation coefficient, coefficient of determination and stimated coefficient of determination between tolerance indices and grain yield, respectively.

†† Methods 1, 2 and 3 are normal distribution confidence interval, percentile confidence interval and bias-corrected confidence interval, respectively.

جدول ۴- ارتباط بین شاخص‌های تحمل به تنش و عملکرد دانه گندم تحت شرایط تنش خشکی (Y_S)

Table 4. Relationships between tolerance indices and wheat grain yield under drought stress conditions (Y_S)

Index	R†	R^2	$\widehat{R}^2$	Bias	Standard error	Confidence interval††					
						Method 1		Method 2		Method 3	
						Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
Y_P	0.61	0.369	0.382	0.013	0.196	-0.016	0.753	0.026	0.773	0.019	0.757
SSI	-0.51	0.265	0.310	0.046	0.175	-0.079	0.608	0.029	0.718	0.021	0.677
STI	0.86	0.736	0.718	-0.018	0.161	0.420	1.051	0.264	0.944	0.247	0.941
TOL	-0.08	0.007	0.065	0.058	0.095	-0.179	0.193	0.000	0.340	0.000	0.070
DI	0.83	0.695	0.689	-0.005	0.163	0.374	1.015	0.301	0.931	0.253	0.916
MP	0.85	0.722	0.699	-0.023	0.174	0.382	1.063	0.193	0.933	0.174	0.928
GMP	0.89	0.790	0.761	-0.028	0.158	0.480	1.099	0.273	0.952	0.249	0.950
HM	0.93	0.848	0.818	-0.030	0.138	0.577	1.119	0.375	0.968	0.359	0.966
K_1STI	0.60	0.354	0.399	0.045	0.174	0.013	0.695	0.085	0.779	0.034	0.691
K_2STI	0.91	0.834	0.827	-0.007	0.089	0.660	1.008	0.613	0.951	0.598	0.949

† R, R^2 and $\widehat{R}^2$ are correlation coefficient, coefficient of determination and stimated coefficient of determination between tolerance indices and grain yield, respectively.

†† Methods 1, 2 and 3 are normal distribution confidence interval, percentile confidence interval and bias-corrected confidence interval, respectively.

نتیجه‌گیری کلی

در بررسی تحمل به تنش زمانی که از شاخص‌های تحمل به تنش استفاده می‌شود، در واقع آماره‌ها و پارامترهای جدیدی ساخته می‌شوند که فاقد آزمون‌های آماری هستند. برای معتبر بودن هر آماره و یا هر نتیجه‌ای عموماً از توزیع‌های آماری استفاده می‌شود، در حالی‌که شاخص‌های تحمل به تنش عموماً فاقد آزمون هستند. یکی از روش‌های مفید جهت آزمون آماری شاخص‌های تحمل به تنش استفاده از توزیع‌های مستخرج از نمونه‌برداری به‌روش بوت‌استرپ است. در این تحقیق، ارتباط بین شاخص‌های تحمل به تنش با عملکرد دانه گندم تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی با استفاده از روش بوت‌استرپ آزمون و شاخص‌های متحمل و با پایداری بیش‌تر مشخص شدند. اگرچه تعداد نمونه‌های این تحقیق کم بود، اما می‌توان آن‌را برای جمعیت‌های بزرگ‌تر با اعتبار بیش‌تری به‌کار برد. این روش می‌تواند به‌عنوان الگویی برای معتبرسازی نتایج حاصل از شاخص‌های تحمل به تنش در ارزیابی‌های مختلف گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

برنامه محاسبه شاخص‌ها و برنامه بوت‌استرپ جهت برآورد حدود اطمینان R^2 در نرم‌افزار SAS

SAS programs to evaluate tolerance indices and bootstrap for R^2 confidence limits

```
data  A;
input  gen$  rep  yp  ys;
datalines;
.
.
Data is intered here
.
.
;
proc  sort  data = boot;
by  gen  rep;
proc  means  noprint  data = boot;
var  ys  yp;
by  gen;
output out = boot2  mean = ys  yp;
run;
proc  means  noprint  data = boot;
var  ys  yp;
output out = boot3  mean = mys  myp;
run;
data  new;
if _n_= 1  then   set  boot3;  set  boot2;
by  gen;
drop  _type_   _freq_;
si = 1-(mys/myp);
ssi = (1-(ys/yp))/si;                    *stress tolerance index;
tol = yp-ys;                             *tolerance;
mp = (ys+yp)/2;                          *mean productivity;
gmp = (yp*ys)**0.5;                      *geometric mean productivity;
sti = (yp*ys)/((myp)**2);                *stress tolerance index;
hm = (2*ys*yp)/(ys+yp);                  *harmonic mean;
di = ys*((ys/yp)/mys);                   *drought resistance index;
k1 = yp**2/myp**2;
k2 = ys**2/mys**2;
k1sti = k1*sti;
k2sti = k2*sti;
rdi = (ys/yp)/(mys/myp);                 *relative drought index;
sspi = ((yp-ys)/(2*myp))*100;            *stress susceptibility percentage index;
sdi = (yp-ys)/yp;                        *sensitivity drought index;
yi = ys/mys;                             *yield index;
ysi = ys/yp;                             *yield stability index;
run;
proc  print  data = new;
run;
proc  corr  data = new;
var  ys  yp  ssi  sti  tol  di  mp  gmp  hm  k1sti  k2sti;
run;
%let  ind = ys;
%let  dep = ssi;
ods  output  fitstatistics = t0;
proc  reg  data = new;
model  &dep = &ind;
run;
quit;
```

```
data _null_;
 set t0;
 if label2 = "r-square" then
 call symput('r2bar', cvalue2);
run;
%let rep = 1000;
proc surveyselect data = new out = bootsample
    seed = 1344 method = urs
          samprate = 1 outhits rep = &rep;
run;
ods listing close;

ods output fitstatistics = t (where = (label2 = "r-square"));
 proc reg data = bootsample;
 by replicate;
  model &dep = &ind;
 run;
 quit;

 * converting character type to numeric type;
data t1;
 set t;
 r2 = cvalue2 + 0;
run;
%let alphalev = 0.05;
ods listing;
proc sql;
  select &r2bar as r2,
        mean(r2) - &r2bar as bias ,
                    std(r2) as std_err,
&r2bar - tinv(1-&alphalev/2, &rep-1)*std(r2) as lb,
&2bar + tinv(1-&alphalev/2, &rep-1)*std(r2) as hb
  From t1;
quit ;
%let alphalev = 0.05;
%let a1 = %sysevalf(&alphalev/2*100);
%let a2 = %sysevalf((1 - &alphalev/2)*100);

 *creating confidence interval, percentile method;
proc univariate data = t1 alpha = 0.05;
  var r2;
  output out = pmethod mean = r2hat pctlpts = &a1 &a2 pctlpre = p pctlname = _lb _ub;
run;
data t2;
  set pmethod;
  bias = r2hat - &r2bar;
  r2 = &r2bar;
run;
ods listing;
proc print data = t2 noobs;
 var r2 bias r2hat p_lb p_ub;
run;
%let alphalev = 0.05;
%let alpha1 = %sysevalf(1 - &alphalev/2);
proc sql;
 select sum(r2<=&r2bar)/count(r2) into :z0bar
```

```
 from t1;
quit;
data _null;_
 z0 = probit(&z0bar);
 zalpha = probit(&alpha1);
 p1 = put(probnorm(2*z0 - zalpha)*100, 3.0);
 p2 = put(probnorm(2*z0 + zalpha)*100, 3.0);
 output;
 call symput('a1', p1);
 call symput('a2', p2);
run;

 *creating confidence interval, bias-corrected method;
proc univariate data = t1 alpha = 0.05;
 var r2;
 output out = pmethod mean = r2hat pctlpts = &a1 &a2 pctlpre = p pctlname = _lb _ub;
run;
data t3;
 set pmethod;
 bias = r2hat - &r2bar;
 r2 = &r2bar;
run;
ods listing;
proc print data = t3 noobs;
 var r2 bias p_lb p_ub;
run;
```

References

Ali, M. B. and El-Sadek, A. N. 2016. Evaluation of drought tolerance indices for wheat (*Triticum aestivum* L.) under irrigated and rainfed conditions. **Communications in Biometry and Crop Science** 11: 77-89.

Blum, A. 1988. Plant breeding for stress environments. CRC Press, Florida. USA. 212 p.

Cameron, A. C. and Trivedi, P. K. 2009. Microeconomics using stata. Stata Press, College Station, Texas, USA.

Cassell, D. L. 2007. Don't be loopy: Re-sampling and simulation the SAS® way. Proceedings of the SAS Global Forum. April 16-19, 2007, Orlando, FL, USA. Paper 183.

Chen, G. and Zhu, J. 2003. Software for the classical quantitative genetics. Institute of Bioinformatics, Zhejiang University, Hangzhou, China.

Chen, L., Cairns, A. J. G. and Kleinow, T. 2017. Small population bias and sampling effects in stochastic mortality modelling. **European Actuarial Journal** 7: 193-230.

Cramer, C. S., Wehner, T. C. and Donaghy, S. B. 1999. PATHSAS: a SAS computer program for path coefficient analysis of quantitative data. **Journal of Heredity** 90: 260-262.

Efron, B. and Tibshirani, R. 1998. An introduction to the bootstrap. Chapman and Hall, Boca Raton, USA.

Farshadfar, F. and Sutka, J. 2002. Screening drought tolerance criteria in maize. **Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae** 50 (4): 411-416.

Fernandez, G. C. J, Chen, H. and Miller, J. C. 1989. Adaptation and environmental sensitivity of mungbean genotypes evaluated in the international mungbean nursery. **Euphytica** 41: 253-261.

Fernandez, G. C. J. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetable and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. August 13-16, 1992, Taiwan.

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

Good, P. I. 2006. Resampling methods. (3rd Ed.). Boston, Birkhauser, USA.

Guyon, I. and Elisseeff, A. 2003. An introduction to variable and feature selection. **Journal of Machine Learning Research** 3: 1157-1182.

Hall, A. E. 1993. Is dehydration tolerance relevant to genotypic differences in leaf senescence and crop adaptation to dry environments? In: Close, T. J. and Bray, E. A. (Eds.), Plant responses to cellular dehydration during environmental stress. The American Society of Plant Pathologist. Rockville, Maryland. pp: 1-10.

Ismaili, A., Karami, F., Akbarpour, O. and Rezaeinejad, A. 2016. Estimation of genotypic correlation and heritability of apricot traits, using restricted maximum likelihood in repeated measures data. **Canadian Journal of Plant Science** 96: 439-447.

Jolliffe, I. T. 1973. Discarding variables in a principal component analysis. II. Real data. **Journal of the Royal Statistical Society C (Applied Statistics)** 22: 21-31.

Kamrani, M., Farzi, A. and Ebadi, A. 2015. Evaluation of grain yield performance and tolerance to drought stress in wheat genotypes using drought tolerance indices. **Cereal Research** 5 (3): 231-246. (In Persian with English Abstract).

Khayatnezhad, M., Hasanuzzaman, M. and Gholamin, R. 2011. Assessment of yield and yield components and drought tolerance at end-of season drought condition on corn hybrids (*Zea mays* L.). **Australian Journal of Crop Science** 5 (12): 1493-1500.

Khodarahmpour, Z., Choukan, R., Bihamta, M. R. and Majidi Hervan, E. 2011. Determination of the best heat stress tolerance indices in maize (*Zea mays* L.) inbred lines and hybrids under Khuzestan province conditions. **Journal of Agricultural Science and Technology** 13: 111-121.

Kristin, A. S., Senra, R. R., Perez, F. I., Enriquez, B. C., Gallegos, J. A. A., Vallego, P. R., Wassimi, N. and Kelley, J. D. 1997. Improving common bean performance under drought stress. **Crop Science** 37: 43-50.

Moghaddam, A., Vollmann, J., Wanek, W., Ardakani, M. R., Raza, A., Pietsch, G. and Friedel, J. K. 2012. Suitability of drought tolerance indices for selecting alfalfa (*Medicago sativa* L.) genotypes under organic farming in Austria. **Crop Breeding** 2: 79-89.

Mohammadi, M., Karimizadeh, R. and Abdipour, M. 2011. Evaluation of drought tolerance in bread wheat genotypes under dryland and supplemental irrigation conditions. **Australian Journal of Crop Science** 5 (4): 487-493.

Rajaie, M., Tahmasebi, S., Bidadi, M., Zare, K. and Sarfarazi, S. 2016. The effect of terminal drought stress on yield and yield components of wheat genotypes. **Cereal Research** 5 (4): 341-352. (In Persian with English Abstract).

Rencher, A. C. 2003. Methods of multivariate analysis. John Wiley and Sons, USA.

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

Sadeghzade Ahari, D. 2006. Evaluation for tolerance to drought stress in dry land promising durum wheat genotypes. **Iranian Journal of Crop Sciences** 8: 30-45. (In Persian with English Abstract).

Shafazadeh, M. K., Yazdansepas, A., Amini, A. and Ghannadha, M. R. 2004. Study of terminal drought tolerance in promising winter and facultative wheat genotypes using stress susceptibility and tolerance indices. **Seed and Plant Improvement Journal** 20: 57-71. (In Persian with English Abstract).

Sideridis G. D. and Simos P. 2010. What is the actual correlation between expressive and receptive measures of vocabulary? Approximating the sampling distribution of the correlation coefficient using the bootstrapping method. **International Journal of Educational and Psychological Assessment** 5: 117-133.

Yang, R. C. 2002. Likelihood-based analysis of genotype–environment interactions. **Crop Science** 42: 1434-1440.

Yang, R. C., Crossa, J., Cornelius, P. L. and Burgueño, J. 2009. Biplot analysis of genotype × environment interaction: Proceed with caution. **Crop Science** 49: 1564-1576.

Zhu, J. and Weir, B. S. 1996. Mixed model approaches for diallel analysis based on a bio-model. **Genetic Research, Cambridge** 68: 233-240.

doi: 10.22124/c.2019.11977.1447

University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 8, No. 4, Winter 2019 (455-469)

Evaluating drought tolerance indices in bread wheat cultivars using bootstrap method

Khadijeh Doulati Pasham[1], Omidali Akbarpour[2*] and Hamidreza Eisvand[3]

Received: November 15, 2018 Accepted: February 23, 2019

Abstract

The use of stress tolerance indexes is one of the most promising methods for selection of stress tolerant genotypes among researchers. In this research, 11 bread wheat cultivars were evaluated in a randomized complete block design with three replications under two non-stress and drought stress conditions at research field of Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran, with warm and dry climate, in 2016-2017 crop season, and different stress tolerance indices were used to evaluate drought tolerance of the studied cultivars. Also, coefficient of determination (R^2, square of the correlation coefficient) between the indices and grain yield under two non-stress and drought stress conditions was used to determine the best indices and R-square confidence intervals of the tolerance indices related to grain yield under non-stress and drought stress conditions were estimated using bootstrap method. The results showed that the modified stress tolerance index under non-stress conditions (K_1STI), geometric mean productivity (GMP) and mean productivity (MP) were the specific indices for non-stress conditions and the modified stress tolerance index under drought stress conditions (K_2STI) and drought index (DI) were the specific indices for drought stress conditions. Harmonic mean (HM) index had also a relatively stable correlation with grain yield under both non-stress (Y_p) and drought stress (Y_s) conditions. Finally, according to all specific and general indices, Aftab was the best cultivar under non-stress conditions and Pougari was identified as the most tolerant cultivar for drought stress conditions.

Keywords: Coefficient of determination, Grain yield, Harmonic mean index, Tolerant varieties

1. M. Sc. Student, Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
* Corresponding author: akbarpour.oa@lu.ac.ir