

شناسایی ژنوتیپ‌های جو (*Hordeum vulgare* L.) متحمل به تنش خشکی بر اساس

## شاخص‌های گزینشی

شاهین قویدل<sup>۱</sup>، علیرضا پورابوقداره<sup>۲\*</sup>، خداداد مصطفوی<sup>۱</sup>

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۲- موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

\* مسئول مکاتبه: a.poraboghadareh@gmail.com

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.371176.1294

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳

## چکیده

تنش خشکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زنده شناخته شده است و به‌طور چشمگیری میزان تولید محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهد. در بین غلات، جو متحمل‌ترین گیاه نسبت به تنش‌های غیرزنده شناخته شده است و در گستره وسیعی از شرایط آب و هوایی کشت می‌شود. به‌منظور ارزیابی پاسخ به تنش خشکی آخر فصل در جو و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی، مجموعه‌ای متشکل از ۱۷ ژنوتیپ امیدبخش جو به همراه رقم جلگه (به‌عنوان شاهد) در دو آزمایش جداگانه به‌صورت بلوک‌های کامل تصادفی در دو شرایط عدم تنش و تنش خشکی با سه تکرار طی دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقات غلات واقع در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (کرج) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه نشان داد، بین ژنوتیپ‌ها و محیط‌ها اختلاف معنی‌داری وجود داشت. به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های پربازده و متحمل برخی از شاخص‌های حساسیت و تحمل به خشکی محاسبه شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص شد شاخص‌های STI، MP، GMP و HM می‌توانند به‌عنوان معیارهای مناسبی جهت گزینش ژنوتیپ‌های متحمل مورد استفاده قرار گیرند. علاوه‌براین، با توجه به نتایج به‌دست آمده از غربال ژنوتیپ‌های ارزیابی‌شده با استفاده از شاخص‌های گزینشی MGIDI، FAI-BLUP و Smith-Hazel مشخص شد ژنوتیپ شماره ۱۳ با شجره "Comp.Cr229//As46/Pro/3/Srs/4/Express/5/D10\*2" علاوه بر داشتن بیشترین عملکرد دانه می‌تواند به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ به تنش خشکی جهت ارزیابی‌های بیشتر معرفی شود.

واژه‌های کلیدی: شاخص MGIDI، ضریب همبستگی، عملکرد دانه، مدل‌های چند متغیره

## مقدمه

زراعی بوده که خود بیانگر اهمیت آن به‌عنوان یک گیاه استراتژیک به‌ویژه جهت تولید علوفه و خوراک دام است. این‌رو اهمیت به بهبود ارقام جهت کشت در مناطق مختلف در کنار افزایش سطح زیر کشت می‌تواند نقش مهمی در افزایش راندمان تولید دانه و علوفه کشور داشته باشد.

در سال‌های اخیر تغییرات اقلیمی به‌طور چشمگیری موجب افزایش شدت تنش‌های محیطی و به دنبال آن کاهش محصولات زراعی شده است. تنش خشکی یا کم‌آبی در حال حاضر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش غیر زیستی نقش مهمی در کاهش محصولات زراعی در اکثر نقاط جهان و ایران دارد (Khalili et al., 2012). از این‌رو آگاهی از پاسخ گیاهان به تنش خشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اصول ابتدایی مقاومت به تنش در گیاهان زراعی را ایجاد می‌کند (Reddy et al., 2004; Zho et al., 2008; Khalili et al. 2012).

پس از گندم، ذرت و برنج، جو از نظر تولید و سطح زیر کشت در رتبه دوم و چهارم ایران و دنیا قرار دارد (Fatemi et al., 2022). از نظر ارزش غذایی، دانه جو حاوی مقادیر قابل توجهی فسفر، کلسیم و تا حدودی انواعی از ویتامین‌ها به‌ویژه ویتامین B می‌باشد (Singh et al., 2021). علاوه‌براین، به دلیل میزان بالای کربوهیدرات‌ها، دانه این گیاه زراعی برای تهیه سوپ، نان و سایر محصولات خوراکی و هم‌چنین تهیه مالت برای صنایع تولیدی نوشیدنی‌های غیرالکلی در ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گیاه زراعی علاوه بر تأمین نیاز غذایی انسان در تأمین خوراک دام و طیور نیز نقش مهمی ایفا می‌کند (Vaezi et al., 2019; Fatemi et al., 2022). بر اساس گزارش سازمان خوار و بار جهانی (FAO) از نظر سطح زیر کشت ایران جز ۱۰ کشور نخست در زمینه کاشت این گیاه

توجه به اینکه سایر شاخص‌ها قادر به ارائه وراثت قابل اغماضی بودند به‌طور مطلوبی نتوانستند ژنوتیپ‌های پر محصول و مقاوم به خشکی را شناسایی کنند. در یک بررسی انجام شده (Akcura *et al.*, 2011) نیز مشخص شد شاخص‌های میانگین بهره‌وری هندسی ( $MP^2$ ) و STI می‌توانند به‌عنوان بهترین شاخص‌ها در آزمایش‌های چند سال و مکان برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی گندم به کار گرفته شوند. در یک مطالعه انجام شده بر روی مجموعه‌ای از ژنوتیپ‌های گندم دوروم مشخص شد مؤثرترین روش برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی انتخاب بر مبنای مقادیر بالای  $GMP^3$  و مقادیر کم  $SSI^4$  می‌باشد (Etminan *et al.*, 2019). در مطالعه‌ای که با هدف ارزیابی پاسخ به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های جو صورت گرفت، مشاهده شد عملکرد دانه در دو شرایط تنش و فاقد تنش همبستگی مثبت و معنی‌داری با شاخص‌های  $GMP$  و STI دارند و از این طریق به‌خوبی قادر به تفکیک ژنوتیپ‌های موجود در گروه A فرناندز بودند (Khalili *et al.*, 2014).

انتخاب بر اساس هر یک از شاخص‌های گزینشی غالباً نتایج متفاوتی ارائه خواهد داد. بنابراین استفاده از روش‌های آماری گوناگون جهت گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها و شناسایی مواد ژنتیکی متحمل و حساس یکی از مرسوم‌ترین استراتژی‌های به‌کار گرفته‌شده توسط محققان می‌باشد. در این راستا می‌توان به استفاده از تجزیه‌های چندمتغیره هم‌چون تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، تجزیه رگرسیون شاخص‌ها، تجزیه به عاملی، تجزیه خوشه‌ای و غیره اشاره نمود. در سال‌های اخیر مدل‌های گزینشی جدیدی بر پایه انتخاب ژنوتیپ‌های برتر با استفاده از عملکرد دانه و سایر صفات از طریق برخی از روش‌های چند متغیره معرفی شده‌اند. از مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان شاخص پایداری چند صفتی ( $MTSI^5$ ) (Olivoto *et al.*, 2019)، شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی ( $MGIDI^6$ ) (Olivoto and Nardino 2020) و شاخص تحلیل عاملی و طراحی ایدئوتیپ از طریق بهترین پیش‌بینی خطی نارایب

به خشکی عبارت است از قابلیت یک گیاه زراعی برای تولید محصول اقتصادی با حداقل افت در شرایط تنش نسبت به شرایط بدون تنش (Mitra, 2001). با توجه به این تعریف داشتن عملکرد نسبی ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی و بدون تنش می‌تواند نقطه شروعی برای شناسایی ژنوتیپ‌های مطلوب برای شرایط پیش‌بینی‌نشده در کشت در شرایط کم آبی و یا دیم باشد (Mohammadi *et al.*, 2010). بنابراین شناسایی ژنوتیپ‌های دارای پتانسیل عملکرد بالا و در عین حال برخوردار از عملکرد قابل قبول برای کشت در مناطق کم باران و خشک به عنوان یکی از اصلی‌ترین اولویت‌های برنامه‌های به‌نژادی محسوب می‌شود.

یکی از مرسوم‌ترین روش‌های ارزیابی ژنوتیپ‌ها و گروه‌بندی آن‌ها از نظر میزان تحمل به خشکی، محاسبه شاخص‌های تحمل و حساسیت مبتنی بر عملکرد دانه می‌باشد. این شاخص‌ها عملکرد گیاه در دو محیط بدون تنش و تنش را در بر می‌گیرند و استفاده از آن‌ها در معرفی ارقامی که در شرایط مطلوب کشت می‌شوند ولی احتمال بروز تنش خشکی در محیط کشت آن‌ها وجود دارد مفید تشخیص داده شده است (Fernandez, 1992). بر اساس عملکرد دانه در شرایط عدم تنش و تنش خشکی، ژنوتیپ‌ها می‌توانند در چهار گروه تقسیم شوند: گروه (A) ژنوتیپ‌هایی که عملکرد خوبی در هر دو محیط تنش و بدون تنش خشکی دارند، گروه (B) ژنوتیپ‌هایی که تنها در شرایط بدون تنش عملکرد بالایی دارند، گروه (C) ژنوتیپ‌هایی که عملکرد بالایی در محیط تنش از خود نشان می‌دهند، و گروه (D) ژنوتیپ‌هایی که در هر دو محیط بدون تنش و تنش خشکی دارای عملکرد ضعیفی هستند (Fernandez, 1992). بر این اساس مناسب‌ترین معیار گزینش برای تحمل به تنش خشکی، شاخصی است که قادر به تشخیص ژنوتیپ‌های موجود در گروه A از سایر گروه‌ها باشد (Fernandez, 1992). در مطالعه‌ای (Saba *et al.*, 2001) که به‌منظور ارزیابی پارامترهای ژنتیکی شاخص‌های تحمل به تنش انجام گرفت مشخص شد که شاخص تحمل به تنش ( $STI^1$ ) وراثت‌پذیری متوسطی داشته و معمولاً قادر است ژنوتیپ‌های پر محصول را در هر دو محیط شناسایی نماید. از طرف دیگر با

<sup>4</sup> Stress susceptibility index

<sup>5</sup> Multi-trait stability index

<sup>6</sup> Multi-trait genotype-ideotype distance index

<sup>1</sup> Stress tolerance index

<sup>2</sup> Mean productivity

<sup>3</sup> Geometric mean productivity

عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی با استفاده از شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش خشکی و هم‌چنین کارایی استفاده از شاخص MGIDI در مطالعات مرتبط با تنش خشکی به اجرا درآمد.

### مواد و روش‌ها

مواد گیاهی مورد ارزیابی در این آزمایش شامل ۱۷ لاین امیدبخش جو به همراه رقم جلگه به‌عنوان شاهد بود. لاین‌های بررسی‌شده حاصل گزینش آزمایش‌های مقایسه عملکرد یکنواخت مناطق سرد کشور بودند. در جدول ۱ شجره لاین‌های مذکور به همراه ارقام شاهد درج شده است. آزمایش طی دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در ایستگاه تحقیقاتی بخش تحقیقات غلات واقع در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر اجرا شد.

(FAI-BLUP<sup>1</sup>) (Rocha *et al.*, 2018) نام برد. در واقع، یکی از مهم‌ترین مدل‌های آماری نو ظهور و مؤثر در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از نظر مجموعه صفات و یا پارامترهای ارزیابی‌شده در گیاهان شاخص MGIDI می‌باشد. این شاخص بر اساس تجزیه به عامل‌ها عمل نموده و پس از شناسایی صفات یا پارامترهای مؤثر در توجیه تغییرات ژنوتیپی بهترین ژنوتیپ را گزینش خواهد نمود. پیش از این سودمندی استفاده از این شاخص آماری در شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به تنش خشکی و هم‌چنین نمونه‌های گیاهی ایده‌آل از نظر مجموعه‌ای از صفات زراعی و فیزیولوژیکی توسط برخی از محققان گزارش شده است (Pour-Aboughadareh and Poczai, 2021a and b; Benakanahalli *et al.*, 2021; Pour-Aboughadareh *et al.*, 2021; Jadidi *et al.*, 2022). در این راستا این تحقیق با هدف ارزیابی مجموعه‌ای از ژنوتیپ‌های امیدبخش جو از نظر

جدول ۱- لیست ژنوتیپ‌های ارزیابی‌شده جو

Table 1- List of the investigated barley genotypes

نماینه Code	شجره Pedigree
G1	Jolge (Check 1)
G2	Bahman/3/MAKOUUE//ZARJOW/80-5151
G3	ALGER/(CI10117/CHOYO../3/Makouee/4/STB-12
G4	Comp.Cr229//As46/Pro/3/Srs/4/Express/5/D10*2
G5	ZARJOW/80-5151//Makouee*2
G6	MAKOUUE/3/ZARJOW/80-5151//Bahman
G7	Radical/Birgit//Pamir-154/3/Rhn-03//L.527/NK1272
G8	CALI92/ROBUST//ND16301
G9	Radical/Birgit//Pamir-154/3/Rhn-03//L.527/NK1272
G10	Yousef/4 /82S:510/3/Arinar/Aths//DS 29
G11	Courlis/Rhn-03//Karooon
G12	Bereke-54/3/Rhn-03//L.527/NK1272
G13	Comp.Cr229//As46/Pro/3/Srs/4/Express/5/D10*2
G14	Pamir-147/Sonata/8/Alpha/Durra/7/P101/5/3896/...
G15	Courlis/Rhn-03//Karooon
G16	(D-16)Bda/Rhn-03//ICB-107766/3/Yousef
G17	Sonata/8/Api/CM67//Hma-03/4/Cq/Cm//Apm/3/...
G18	Nadawa/Rhn-03//Birka

تسطیح نمودن زمین جهت تقویت خاک کودهای فسفات آمونیوم، اوره و پتاس به ترتیب به میزان ۲۰۰، ۱۰۰ و ۵۰

قبل از کاشت بذور عملیات تهیه زمین بر اساس دستورالعمل کارشناسان مزرعه صورت گرفت. بعد از شخم و

<sup>1</sup> Factor analysis and ideotype design via best linear unbiased prediction

کیلوگرم در هکتار تخمین زده شد.

پس از حصول داده‌های مربوط به عملکرد دلنه هر یک از ژنوتیپ‌های ارزیابی‌شده در هر دو شرایط عدم تنش و تنش خشکی، تجزیه واریانس مرکب انجام گرفت. برای مقایسه لاین‌ها و ارقام شاهد از نظر عملکرد دانه از آزمون LSD استفاده شد. جهت شناسایی لاین‌های مربوط به گروه A فرناندز برخی از شاخص‌های تحمل و حساسیت به شرح جدول ۲ با استفاده از نرم‌افزار برخط iPASTIC محاسبه شد (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2019). پس از محاسبه شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش، جهت شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از شاخص‌های MGIDI, Smith-Hazel و شاخص تحلیل عاملی و طراحی ایدئوتیپ از طریق مدل بهترین پیش‌بینی‌های خطی ناریب (FAI-BLUP) با استفاده از بسته metan در محیط R محاسبه شد (Olivoto and Lucio, 2020). از یک نمودار حرارتی ترسیم‌شده بر اساس ضرایب همبستگی پیرسون (Pearson's correlation coefficients) جهت نشان دادن روابط بین هر یک از شاخص‌های محاسبه‌شده و عملکردهای دانه در دو شرایط محیطی استفاده شد.

کیلوگرم در هکتار استفاده شد. بذور هر یک از لاین‌های مورد بررسی با استفاده از دستگاه بذرکار مدل Wintersteiger و با تراکم ۴۵۰ دانه در متر مربع کشت شدند. در طول فصل رشد و توسعه گیاه، جهت کنترل علف‌های هرز پهن‌برگ و باریک‌برگ به ترتیب از پوماسوپر (Puma super) و گرانستار (Granstar) استفاده شد. کلیه لاین‌ها به همراه رقم شاهد در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به صورت جداگانه در دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی کشت شدند. روش اعمال تنش خشکی به صورت قطع آبیاری صورت گرفت. اولین آبیاری پس از کاشت اعمال شد، سپس به فاصله زمانی ۱۰ روز یک‌بار آبیاری به صورت مرتب انجام و تا زمان مورد نظر برای اعمال تنش خشکی ادامه یافت. در شرایط تنش خشکی، قطع آبیاری در ۵۰ درصد سنبله‌دهی اعمال شد (Dehghani *et al.*, 2020). با این حال، آبیاری در آزمایش مربوط به شرایط عدم تنش به صورت مرتب و با فاصله زمانی در نظر گرفته شده اعمال شد. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی و پس از حذف اثرات حاشیه کل کرت آزمایشی (شش متر مربع) با استفاده از کمپاین آزمایشی مدل Wintersteiger برداشت و عملکرد دانه برحسب

جدول ۲- روابط ریاضی شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی محاسبه‌شده

Table 2- Mathematic relations for calculated tolerance and susceptible drought indices

ردیف No.	فرمول Formula	الگوی انتخاب Selection pattern	شاخص Index	منبع Reference
1	$TOL = Y_p - Y_s$	Minimum value	شاخص تحمل Tolerance Index	Rosielle and Hamblin (1981)
2	$MP = \frac{Y_p + Y_s}{2}$	Maximum value	بهره‌وری متوسط Mean Productivity	Rosielle and Hamblin (1981)
3	$GMP = \sqrt{Y_s \times Y_p}$	Maximum value	میانگین هندسی بهره‌وری Geometric Mean Productivity	Fernandez (1992)
4	$HM = \frac{2(Y_s \times Y_p)}{(Y_s + Y_p)}$	Maximum value	میانگین هارمونیک Harmonic Mean	Bidinger <i>et al.</i> (1978)
5	$SSI = \frac{1 - (Y_s / Y_p)}{1 - (\bar{Y}_s / \bar{Y}_p)}$	Minimum value	شاخص حساسیت تنش Stress Susceptibility Index	Fischer and Maurer (1978)
6	$STI = \frac{Y_s \times Y_p}{(\bar{Y}_p)^2}$	Maximum value	شاخص تحمل تنش Stress Tolerance Index	Fernandez (1992)
7	$YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s}$	Maximum value	شاخص عملکرد Yield Index	Gavuzzi <i>et al.</i> (1997)
8	$YSI = \frac{Y_s}{Y_p}$	Maximum value	شاخص پایداری عملکرد Yield Stability Index	Bousslama and Schapaugh (1984)
9	$RSI = \frac{(Y_s / Y_p)}{(\bar{Y}_s / \bar{Y}_p)}$	Maximum value	شاخص تنش نسبی Relative Stress Index	Fischer <i>et al.</i> (1979)

## نتایج و بحث

## تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌های دو ساله نشان داد اثرات سال، محیط و ژنوتیپ معنی‌دار بود. علاوه بر این، اثرات متقابل ژنوتیپ × سال، ژنوتیپ × سال × محیط نیز معنی‌دار بودند. ضریب تغییرات برای عملکرد دانه ۱۳/۱۳ درصد برآورد شد که نشان‌دهنده وجود تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌های ارزیابی‌شده از نظر پاسخ به شرایط تنش خشکی طی دو سال

مورد بررسی است (جدول ۳). از این رو به نظر می‌رسد دست‌یابی به ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی دور از انتظار نخواهد بود. پیش از این در بسیاری از مطالعات صورت گرفته نیز اختلاف معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها و ارقام مختلف جو در شرایط تنش خشکی گزارش شده است که با نتایج به‌دست آمده از این پژوهش مطابقت دارند (Khalili *et al.*, 2014; Sharifi-*Alhosseini and Taherian*, 2019; Cai *et al.*, 2020; Faiziasl *et al.*, 2022).

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه در شرایط عدم تنش و تنش خشکی در ژنوتیپ‌های ارزیابی‌شده جو

Table 3- Combined analysis of variance for grain yield under control and drought stress conditions in investigated barley

genotypes			
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	درصد واریانس توجیه شده
S.O.V	df	MS	EV (%)
سال	1	220.25***	52.67
Year (Y)			
محیط	1	59.17***	14.15
Environment (E)			
سال × محیط	1	15.56 <sup>ns</sup>	3.72
Y × E			
تکرار / (سال و محیط)	8	0.14	
Replication / (Y & E)			
ژنوتیپ	17	1.64***	6.67
Genotype (G)			
ژنوتیپ × سال	17	0.96**	3.90
G × Y			
ژنوتیپ × محیط	17	0.38 <sup>ns</sup>	1.54
G × E			
ژنوتیپ × محیط × سال	17	0.84*	3.41
Y × E × G			
خطا	136	0.42	
Error			
ضریب تغییرات		13.13	
CV (%)			

ns, \*, \*\*, and \*\*\* indicated non-significant and significant at  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ , and  $P < 0.001$ , respectively

نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها عملکرد بالاتری داشتند. ژنوتیپ G13 از نظر کلیه شاخص‌های تحمل و حساسیت به‌عنوان یکی از متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شد. علاوه بر این ژنوتیپ، G16 نیز به‌جز Yp (عملکرد دانه در شرایط عدم تنش) از نظر سایر شاخص‌ها دارای نمود بهتری بود و به‌عنوان دیگر ژنوتیپ متحمل به خشکی از سایر ژنوتیپ‌ها متمایز شد. ژنوتیپ G14 از نظر شاخص‌های YI, HM, Ys, YSI و RSI دارای بیشترین

## شاخص‌های حساسیت و تحمل تنش

نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی در هر یک از ژنوتیپ‌های مورد بررسی جو به تفکیک دو سال زراعی و هم‌چنین میانگین دو ساله در جداول ۴، ۵ و ۶ ارائه شد است. در سال اول، ژنوتیپ‌های G7، G9، G13 و G15 دارای بالاترین عملکرد دانه در شرایط عدم تنش بودند. در شرایط تنش خشکی، ژنوتیپ‌های G4، G13، G14 و G16

ژنوتیپ متحمل شناخته شد. ژنوتیپ G4 نیز علاوه بر Ys از نظر شاخص‌های MP، GMP، HM، STI و YI به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها شناسایی شد (جدول ۴).

مقادیر و از نظر شاخص‌های TOL و SSI دارای کمترین مقادیر بود. ژنوتیپ شاهد (G1) تنها از نظر شاخص‌های TOL، SSI، YSI و RSI دارای برتری نسبی نسبت به دیگر ژنوتیپ‌ها بود. ژنوتیپ G9 اگرچه از نظر Yp جزو ژنوتیپ‌های برتر بود، با این حال تنها از نظر شاخص‌های MP، GMP و STI به‌عنوان

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های حساسیت و تحمل به تنش در ۱۸ ژنوتیپ ارزیابی شده جو در سال اول

Table 4- Values for susceptible and tolerance drought indices in the 18 investigated barley genotypes in the first year

Code	Yp	Ys	TOL	MP	GMP	HM	SSI	STI	YI	YSI	RSI	Fernandez's grouping
												pattern
G1	4.19	4.02	0.17	4.10	4.10	4.10	0.20	0.88	1.15	0.96	1.20	A
G2	4.22	2.63	1.59	3.42	3.33	3.24	1.88	0.58	0.75	0.62	0.78	B
G3	4.40	2.68	1.72	3.54	3.44	3.33	1.95	0.62	0.77	0.61	0.76	B
G4	4.44	4.05	0.39	4.24	4.24	4.24	0.44	0.94	1.16	0.91	1.14	A
G5	4.38	3.36	1.02	3.87	3.83	3.80	1.16	0.77	0.96	0.77	0.96	B
G6	4.11	3.05	1.06	3.58	3.54	3.50	1.28	0.66	0.87	0.74	0.93	B
G7	4.61	2.70	1.92	3.65	3.53	3.40	2.07	0.65	0.77	0.58	0.73	B
G8	4.20	3.50	0.70	3.85	3.83	3.81	0.83	0.77	1.00	0.83	1.04	A
G9	4.75	3.61	1.15	4.18	4.14	4.10	1.20	0.90	1.03	0.76	0.95	A
G10	3.85	3.26	0.58	3.56	3.54	3.53	0.76	0.66	0.94	0.85	1.06	D
G11	4.37	3.82	0.55	4.09	4.08	4.07	0.63	0.88	1.09	0.87	1.09	A
G12	4.32	2.86	1.46	3.59	3.51	3.44	1.68	0.65	0.82	0.66	0.83	B
G13	4.64	4.56	0.08	4.60	4.60	4.60	0.09	1.11	1.31	0.98	1.23	A
G14	4.12	4.10	0.02	4.11	4.11	4.11	0.02	0.89	1.18	1.00	1.25	A
G15	4.78	3.40	1.38	4.09	4.03	3.97	1.44	0.85	0.97	0.71	0.89	B
G16	4.27	4.35	-0.07	4.31	4.31	4.31	-0.08	0.97	1.25	1.02	1.27	A
G17	4.49	3.68	0.81	4.09	4.07	4.05	0.90	0.87	1.06	0.82	1.03	A
G18	4.45	3.20	1.26	3.82	3.77	3.72	1.40	0.75	0.92	0.72	0.90	B

به‌منظور بررسی تکرارپذیری نتایج به‌دست‌آمده از غربال ژنوتیپ‌های بررسی شده از نظر هر یک از شاخص‌های تحمل و حساسیت، محاسبات بر اساس داده‌های دو ساله انجام و نتایج آن در جدول ۶ درج شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، از نظر شاخص Yp ژنوتیپ‌های G1، G4، G13 و G18 نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها دارای بیشترین مقادیر بودند. دو ژنوتیپ G4 و G13 به همراه G11 و G16 دارای بالاترین عملکرد دانه در شرایط تنش (Ys) بودند. ژنوتیپ G16 از نظر تمام شاخص‌ها به جز Yp به‌عنوان ژنوتیپ برتر شناسایی شد. ژنوتیپ G13 نیز از نظر تمام شاخص‌ها به جز TOL به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ انتخاب گردید. ژنوتیپ‌های G4 و G10 از نظر شاخص‌های Yp، Ys، MP، GMP، HM، STI و YI نسبت به دیگر ژنوتیپ‌ها متحمل بودند.

در سال دوم نتایج به‌دست‌آمده از غربال ژنوتیپ‌های بررسی شده از نظر شاخص‌های تحمل و حساسیت متفاوت بود. ژنوتیپ‌های G1، G4، G13 و G18 از نظر Yp و ژنوتیپ‌های G4، G7، G11 و G13 نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها دارای عملکرد دلنه بالاتری در شرایط تنش بودند (Ys). در بین ژنوتیپ‌های ارزیابی‌شده G7 از نظر کلیه شاخص‌ها به‌جز Yp به‌عنوان برترین ژنوتیپ شناسایی شد. ژنوتیپ G4 نیز از نظر شاخص‌های Yp، Ys، MP، GMP، HM، STI و YI به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ شناسایی شد. دو ژنوتیپ G11 و G13 نیز از نظر اکثر شاخص‌ها به‌عنوان ژنوتیپ متحمل شناسایی شدند. به عبارت دیگر، G11 از نظر شاخص‌های Ys، MP، GMP، HM، STI و YI جزو ژنوتیپ‌های برتر بود و ژنوتیپ G13 مشابه G11 علاوه بر شاخص ذکر شده از نظر Yp نیز برتری قابل توجهی نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشت (جدول ۵).

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های حساسیت و تحمل به تنش در ۱۸ ژنوتیپ ارزیابی‌شده جو در سال دوم

Table 5- Values for susceptible and tolerance drought indices in the 18 investigated barley genotypes in the second year

Code	Yp	Ys	TOL	MP	GMP	HM	SSI	STI	YI	YSI	RSI	Fernandez's grouping pattern
G1	7.34	4.74	2.60	6.04	5.90	5.76	1.91	0.81	0.89	0.65	0.79	B
G2	7.00	5.40	1.60	6.20	6.15	6.10	1.23	0.88	1.01	0.77	0.95	B
G3	7.08	5.40	1.68	6.24	6.18	6.13	1.28	0.89	1.01	0.76	0.94	B
G4	7.78	6.13	1.65	6.96	6.91	6.86	1.14	1.11	1.15	0.79	0.97	A
G5	6.07	5.17	0.90	5.62	5.60	5.58	0.80	0.73	0.97	0.85	1.05	D
G6	6.32	5.46	0.86	5.89	5.87	5.86	0.73	0.80	1.02	0.86	1.06	D
G7	6.40	6.79	-0.39	6.60	6.59	6.59	-0.33	1.01	1.27	1.06	1.30	C
G8	5.93	4.42	1.51	5.18	5.12	5.06	1.37	0.61	0.83	0.75	0.92	D
G9	6.40	5.60	0.80	6.00	5.99	5.97	0.67	0.83	1.05	0.88	1.07	C
G10	5.16	4.35	0.81	4.76	4.74	4.72	0.84	0.52	0.82	0.84	1.04	D
G11	7.00	5.70	1.30	6.35	6.32	6.28	1.00	0.93	1.07	0.81	1.00	A
G12	5.79	5.49	0.30	5.64	5.64	5.64	0.28	0.74	1.03	0.95	1.16	C
G13	7.48	5.93	1.55	6.71	6.66	6.62	1.12	1.03	1.11	0.79	0.97	A
G14	6.49	5.22	1.27	5.86	5.82	5.79	1.05	0.79	0.98	0.80	0.99	B
G15	6.21	5.06	1.15	5.64	5.61	5.58	1.00	0.73	0.95	0.81	1.00	D
G16	6.43	5.67	0.76	6.05	6.04	6.03	0.64	0.85	1.06	0.88	1.08	C
G17	5.92	4.18	1.74	5.05	4.97	4.90	1.58	0.58	0.78	0.71	0.87	D
G18	7.19	5.36	1.83	6.28	6.21	6.14	1.37	0.90	1.00	0.75	0.92	B

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های حساسیت و تحمل به تنش در ۱۸ ژنوتیپ ارزیابی‌شده جو بر اساس داده‌های دوساله

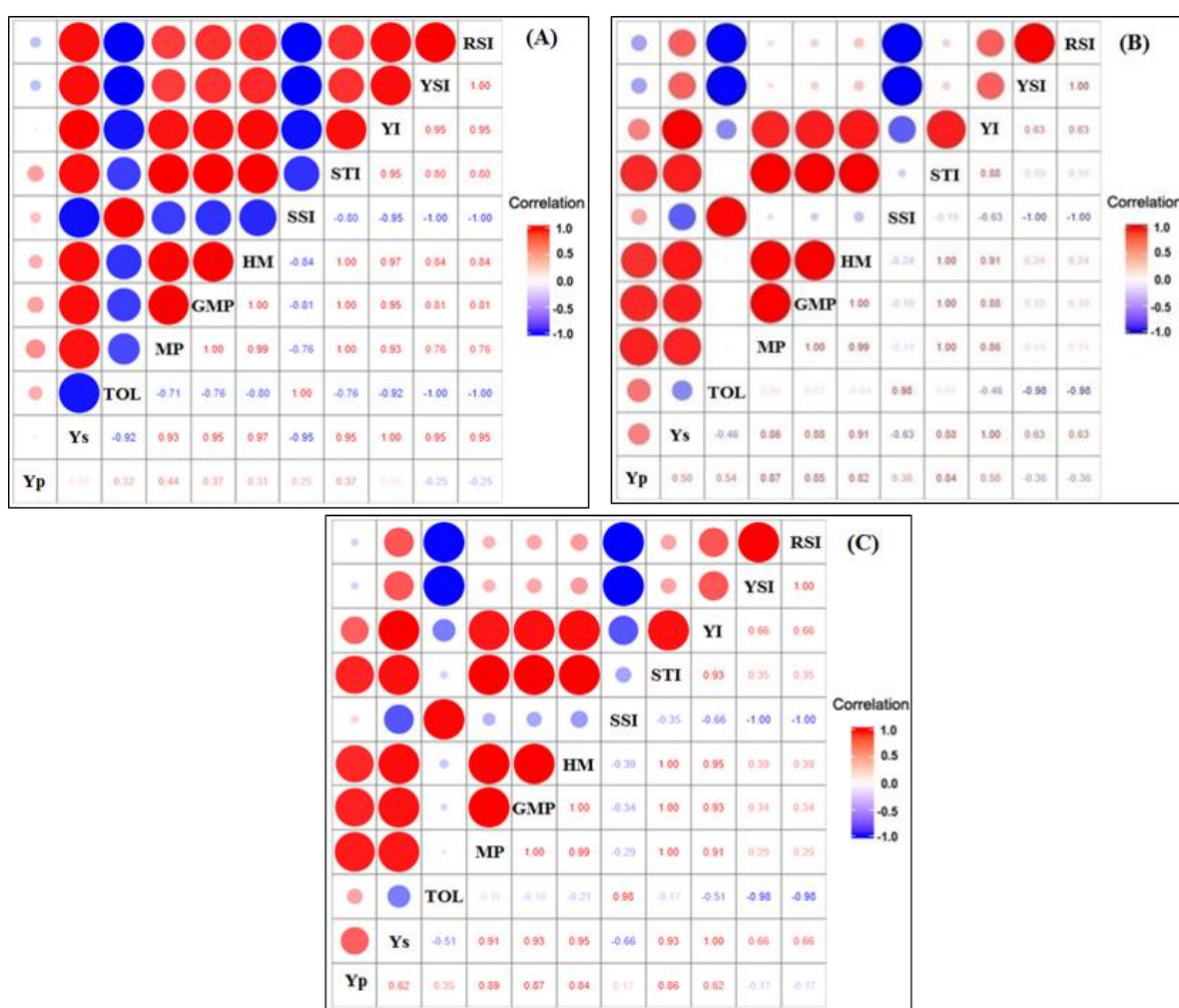
Table 6- Values for susceptible and tolerance drought indices in the 18 investigated barley genotypes based on two-years data

Code	Yp	Ys	TOL	MP	GMP	HM	SSI	STI	YI	YSI	RSI	Fernandez's grouping pattern
G1	5.76	4.38	1.38	5.07	5.02	4.98	1.25	0.85	0.99	0.76	0.94	B
G2	5.61	4.02	1.59	4.82	4.75	4.68	1.48	0.76	0.91	0.72	0.89	B
G3	5.74	4.04	1.70	4.89	4.82	4.74	1.54	0.78	0.92	0.70	0.87	B
G4	6.11	5.09	1.02	5.60	5.58	5.55	0.87	1.04	1.15	0.83	1.03	A
G5	5.22	4.26	0.96	4.74	4.72	4.69	0.96	0.75	0.97	0.82	1.01	D
G6	5.22	4.26	0.96	4.74	4.72	4.69	0.96	0.75	0.97	0.82	1.01	D
G7	5.51	4.74	0.77	5.13	5.11	5.10	0.73	0.88	1.07	0.86	1.06	A
G8	5.07	3.96	1.11	4.52	4.48	4.45	1.14	0.67	0.90	0.78	0.97	D
G9	5.58	4.6	0.98	5.09	5.07	5.04	0.92	0.86	1.04	0.82	1.02	A
G10	4.51	3.81	0.70	4.16	4.15	4.13	0.81	0.58	0.86	0.84	1.05	D
G11	5.69	4.76	0.93	5.23	5.20	5.18	0.85	0.91	1.08	0.84	1.04	A
G12	5.05	4.18	0.87	4.62	4.59	4.57	0.90	0.71	0.95	0.83	1.02	D
G13	6.06	5.25	0.81	5.66	5.64	5.63	0.70	1.07	1.19	0.87	1.07	A
G14	5.31	4.66	0.65	4.99	4.97	4.96	0.64	0.83	1.06	0.88	1.09	B
G15	5.49	4.23	1.26	4.86	4.82	4.78	1.20	0.78	0.96	0.77	0.95	D
G16	5.35	5.01	0.34	5.18	5.18	5.17	0.33	0.90	1.13	0.94	1.16	B
G17	5.21	3.93	1.28	4.57	4.52	4.48	1.28	0.69	0.89	0.75	0.93	D
G18	5.82	4.28	1.54	5.05	4.99	4.93	1.38	0.84	0.97	0.74	0.91	B

### روابط بین شاخص‌های گزینشی محاسبه‌شده و عملکرد دانه

نمودار حرارتی ترسیم‌شده بر اساس ضرایب همبستگی پیرسون بین عملکرد دانه در دو شرایط عدم تنش و تنش خشکی با هر یک از شاخص‌های تحمل و حساسیت تنش به‌صورت جداگانه براساس هر سال و همچنین مجموع داده‌های دو ساله در شکل ۱ ارائه شده است. ثابت شده‌است که شاخص‌هایی که دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط عدم تنش و تنش خشکی باشند می‌توانند

به‌عنوان بهترین شاخص‌ها برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش استفاده شوند (Mitra, 2001). براین اساس، شاخص‌های MP، GMP و STI با عملکرد دانه در هر دو شرایط محیطی (به‌ویژه شرایط خشکی) دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری بودند (شکل A-۱). در مقابل در سال دوم، شاخص‌های STI، HM، MP و GMP همبستگی مثبت و معنی‌داری با  $Y_p$  و  $Y_s$  داشتند؛ ازاین‌رو شاخص‌های اخیر می‌توانند به‌عنوان ابزاری جهت غربال ژنوتیپ‌های متحمل مورد استفاده قرار گیرند (شکل B-۱).



شکل ۱- نمودار حرارتی ترسیم‌شده مبتنی بر ضرایب همبستگی پیرسون بین عملکردهای دانه در دو شرایط عدم تنش و تنش خشکی با شاخص‌های تحمل و حساسیت بر اساس داده‌های سال اول (A)، سال دوم (B) و متوسط دو سال (C)

Figure 1- Heat-maps rendered based on the Pearson's correlation coefficients between grain yields under control and stress conditions with drought tolerance and susceptible indices for the first year (A), second year (B), and average two-year data (C)

۱-C مشاهده می‌شود شاخص‌های MP، GMP، STI و HM با عملکرد دانه در شرایط عدم تنش و تنش خشکی دارای

به‌منظور بررسی تکرارپذیری روابط بین شاخص‌ها همبستگی بین شاخص‌ها بررسی شد. همان‌گونه که در شکل



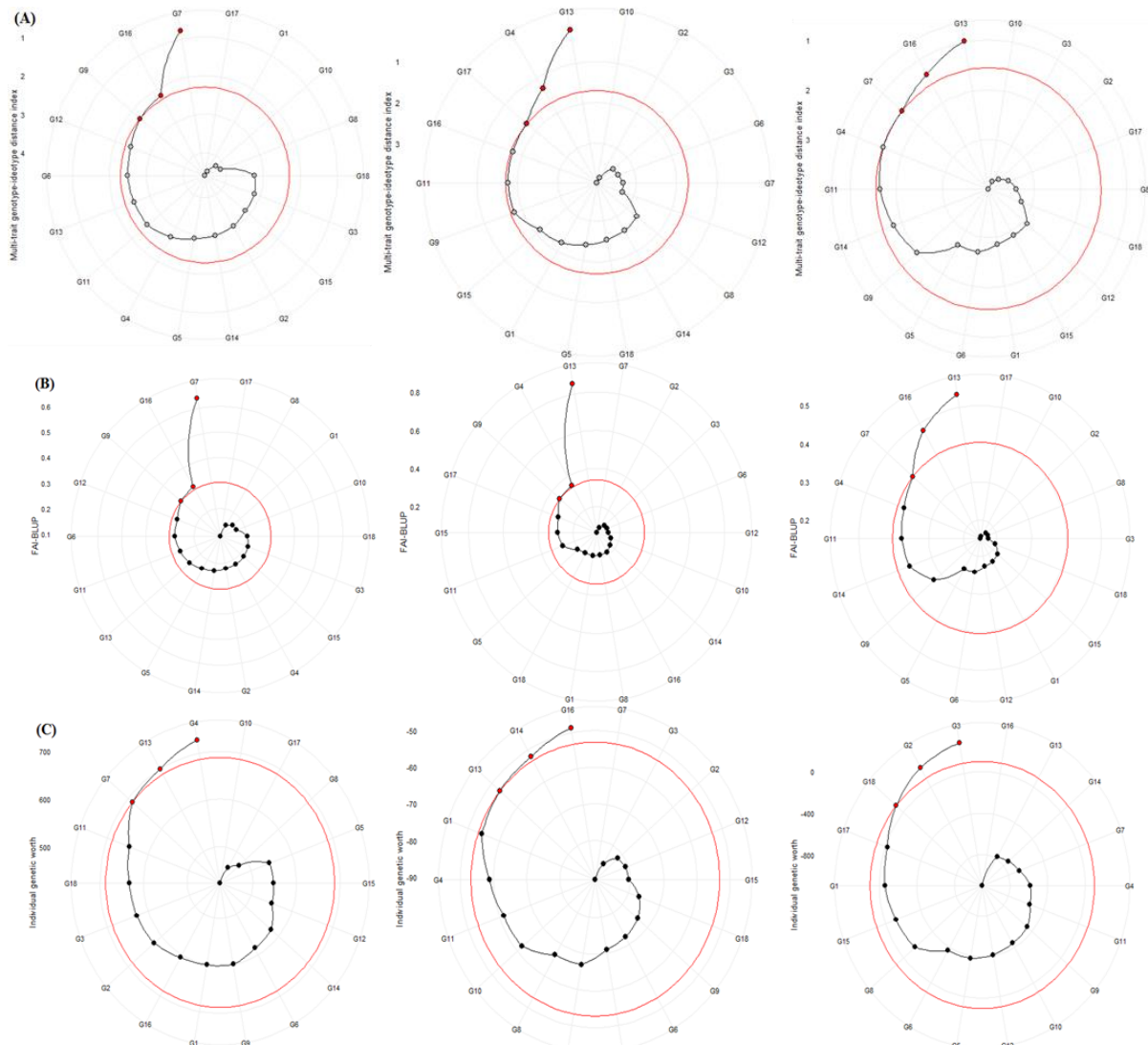
به‌عنوان گروه D از دیگر ژنوتیپ‌ها متمایز شدند. بر اساس متوسط داده‌های دو ساله نیز کلیه ژنوتیپ‌ها در سه گروه A، B و D دسته‌بندی شدند. گروه A شامل ژنوتیپ‌های G4، G7، G9، G11 و G13 بود. در ژنوتیپ‌های G1، G2، G3، G14، G16 و G18 در گروه B قرار گرفتند و سایر ژنوتیپ‌ها در گروه D گروه‌بندی شدند. در این سال هیچ ژنوتیپی در گروه C قرار نداشت (جدول ۶). با توجه به نتایج به‌دست آمده در این رابطه مشخص شد دو ژنوتیپ G4 و G13 به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها شناخته شدند.

### شناسایی متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها با استفاده از مدل‌های گزینشی

در مطالعه حاضر نیز جهت انتخاب برترین ژنوتیپ‌ها بر اساس تمامی شاخص‌های محاسبه‌شده و عملکردهای دانه از سه مدل FAI، MGIDI و Smith-Hazel استفاده شد. در هر یک از این مدل‌ها هر یک از شاخص‌های تحمل و حساسیت در کنار عملکرد دانه به‌عنوان یک متغیر در نظر گرفته شدند. نتایج به‌دست‌آمده از هر یک از مدل‌های آماری به‌صورت گرافیکی در شکل ۲ نشان داده شده‌است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از غربال ژنوتیپ‌ها بر اساس شاخص MGIDI ژنوتیپ‌های G7، G9 و G16 در سال اول، ژنوتیپ‌های G4، G13 و G17 در سال دوم و ژنوتیپ‌های G7، G13 و G16 در متوسط دو سال اجرای آزمایش به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل خشکی شناسایی شدند (شکل A-۲). ژنوتیپ‌های G7، G9 و G17 در سال اول، ژنوتیپ‌های G4، G9 و G13 در سال دوم و ژنوتیپ‌های شماره G7، G13 و G16 بر اساس متوسط داده‌های دوساله به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها از طریق شاخص FAI-BLUP از دیگر ژنوتیپ‌ها متمایز شدند (شکل B-۲). شاخص Smith-Hazel نیز سه ژنوتیپ را بر اساس هر یک از مجموعه داده‌ها به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر شناسایی کرد. در سال اول ژنوتیپ‌های شماره G4، G7 و G13 جزو ژنوتیپ‌های ایده‌آل بودند. ژنوتیپ‌های G13، G14، G16 و G18 و سه ژنوتیپ G2، G3 و G18 به‌ترتیب به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها بر اساس داده‌های سال دوم و متوسط داده‌های دو ساله انتخاب شدند (شکل C-۲).

همبستگی مثبت و معنی‌داری بودند. از این‌رو، چهار شاخص فوق‌الذکر می‌توانند به‌عنوان برترین شاخص‌ها جهت غربال مواد ژنتیکی در برنامه‌های به‌نژادی مورد استفاده قرار گیرند. گزارشی شده است که در شرایط تنش ملایم شاخص‌های STI، MP و GMP برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در شرایط تنش و بدون تنش مناسب هستند (Sio-se Mardeh *et al.*, 2006). در دیگر پژوهشی که با هدف شناسایی متحمل‌ترین ژنوتیپ‌های نخود صورت گرفت (Poursiahbidi and Pour-Aboughadareh, 2013)، مشخص شد شاخص‌های MP، GMP و STI مؤثرترین شاخص‌ها جهت شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی می‌باشند. همچنین وجود همبستگی بالای معنی‌دار و مثبت Yp و Ys با شاخص‌های MP و STI حاکی از آن است که شاخص‌های مذکور می‌توانند به‌عنوان مؤثرترین شاخص‌ها جهت گزینش لاین‌های متحمل به خشکی در نظر گرفته شوند. این نتیجه با نتایج سایر محققان مطابقت نشان داد (Saba *et al.*, 2001; Nouri *et al.*, 2011; Khalili *et al.*, 2012; Naghavi *et al.*, 2013; Khalili *et al.*, 2014; Etmnan *et al.*, 2019; Pour-Aboughadareh *et al.*, 2020).

نظر به‌اینکه در بین شاخص‌های محاسبه‌شده شاخص STI دارای همبستگی قوی با عملکرد دانه در دو شرایط محیطی در هر یک از سال‌های اجرای آزمایش و متوسط دو سال بود، از این‌رو جهت گروه‌بندی ژنوتیپ‌های ارزیابی شده بر اساس تئوری ارائه شده توسط Fernandez (1992)، از میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش به همراه شاخص STI استفاده شد. همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، ژنوتیپ‌های G1، G4، G8، G9، G11، G13، G14، G16 و G17 در گروه A قرار گرفتند. گروه B شامل ژنوتیپ‌های G2، G3، G5، G6، G7، G12، G15 و G18 بود. هیچ ژنوتیپی به گروه C تعلق نداشت و تنها ژنوتیپ G10 در گروه D جای گرفت. در سال دوم، ژنوتیپ‌ها واکنش متفاوتی نشان داشتند به‌طوری‌که گروه A در برگیرنده ژنوتیپ‌های G4، G11 و G13 بود. ژنوتیپ‌های G1، G2، G3، G14 و G18 در گروه B قرار گرفتند. در گروه C نیز ژنوتیپ‌های G7، G9، G12 و G16 قرار داشتند. علاوه‌براین، ژنوتیپ‌های G5، G6، G8، G10، G15 و G17



شکل ۲- نمودارهای ترسیم‌شده بر اساس شاخص‌های (A) MGIDI، (B) FAI-BLUP و (C) Smith-Hazel بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از سال اول، دوم و متوسط دو سال (به ترتیب از چپ به راست). دایره قرمز مرکزی بیانگر نقطه برش بر اساس شدت انتخاب می‌باشد. علاوه‌براین، ژنوتیپ‌های منتخب بر اساس هر شاخص نیز با دایره‌های قرمز رنگ مشخص شده‌اند.

Figure 2- Circle plots rendered based on the MGIDI (A), FAI-BLUP (B), and Smith-Hazel (C) indices for the first year data (A), second year data (B), and average two-year data (C). The central red circle indicate the determined cut-point based on selection pressure. Moreover, selected genotypes highlighted using red circles.

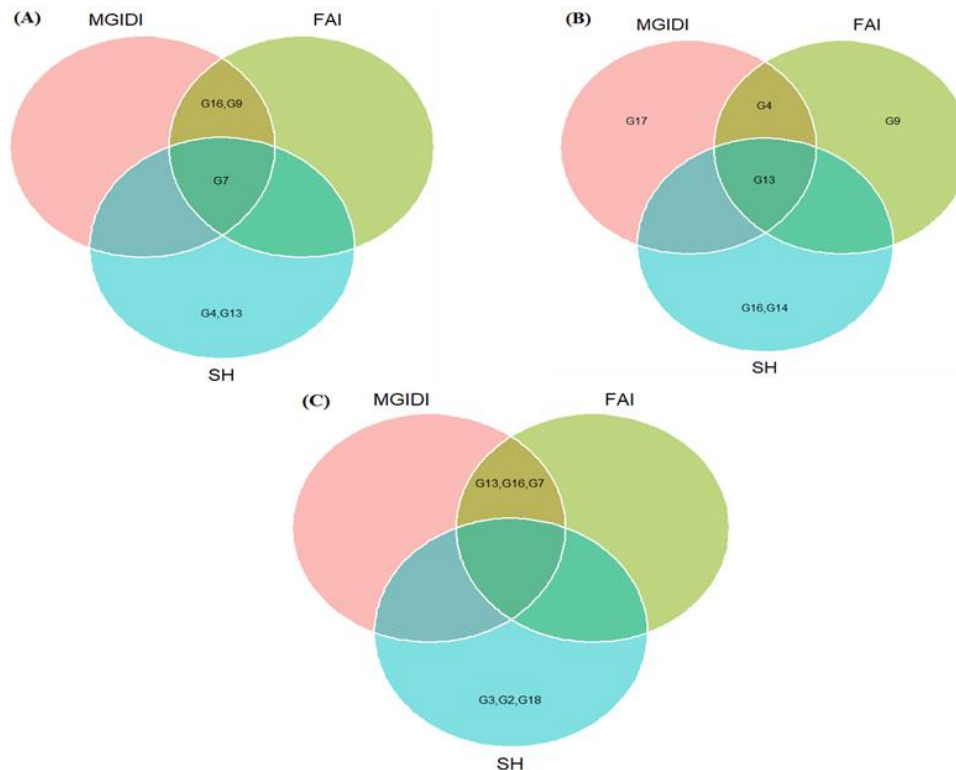
داشت (Silva *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2019; Woyann *et al.*, 2019; Olivoto *et al.*, 2021; Pour-Aboughadareh *et al.*, 2021; Pour-Aboughadareh and Poczai, 2021 a, b; Jadidi *et al.*, 2022).

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از هر شاخص مشخص شد که در سال اول و دوم به ترتیب ژنوتیپ‌های G7 و G13 به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد دانه و تحمل به تنش خشکی شناسایی شدند (اشکال ۱-A و ۱-B). با در نظر گرفتن نتایج حاصله از داده‌های دو ساله و سه شاخص FAI-، MGIDI

استفاده از شاخص‌ها و مدل‌های آماری مبتنی بر صفات و پارامترهای مختلف به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌ها جهت گزینش ژنوتیپ‌ها و ارقام برخوردار از پتانسیل عملکرد بالا و فنوتیپ مطلوب بشمار می‌آید. در مطالعات متعددی از شاخص‌هایی گزینشی برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر دیگر گیاهان زراعی هم‌چون علف فیل (*Cenchrus purpureus*) گندم، جو، سویا، لوبیا و سورگوم استفاده و کارایی بالایی از آن‌ها گزارش شده است که در این راستا، نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق با سایر نتایج گزارش شده توسط دیگر محققان مطابقت

شاخص‌های MGIDI و FAI-BLUP از سایر ژنوتیپ‌ها متمایز شدند (شکل C-۱).

Smith-Hazel و BLUP مشخص شد الگوی گزینشی یکسانی بین سه شاخص وجود نداشت، با این حال ژنوتیپ‌های G7، G13 و G16 به عنوان ژنوتیپ‌های منتخب با استفاده از



شکل ۳- نودار ون ترسیم‌شده مبتنی شاخص‌های MGIDI، FAI-BLUP، و Smith-Hazel بر اساس داده‌های سال اول (A)، سال دوم (B) و متوسط دو سال (C)

Figure 3- Venn diagrams rendered based on the MGIDI, FAI-BLUP, and Smith-Hazel indices for the first year data (A), second year data (B), and average of two-year data (C)

FAI-BLUP کارایی بالایی در گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی داشته و کارایی لازم جهت استفاده در دیگر آزمایش‌های به‌نژادی با هدف شناسایی ژنوتیپ‌های برخوردار از صفات زراعی مطلوب را دارند. به‌طور کلی با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه ژنوتیپ G13 به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ و با داشتن بیشترین عملکرد دانه در هر سال و مجموع دو سال اجرای آزمایش جهت ارزیابی‌های بیشتر در مطالعات سازگاری و پایداری شناسایی شد.

### تعارض منافع

نویسندگان اظهار می‌نمایند که هیچ‌گونه تعارض منافی در رابطه با نشر این مقاله وجود ندارد.

### نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه مشخص شد بین ژنوتیپ‌های امیدبخش جو از نظر پاسخ به شرایط تنش خشکی آخر فصل تفاوت معنی‌دار وجود دارد که این نتیجه امکان شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی را فراهم نمود. بررسی روابط بین شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی با عملکردهای دانه به دست آمده در هر دو شرایط عدم تنش و تنش خشکی نشان داد شاخص‌های STI، MP، GMP و HM می‌توانند به‌عنوان برترین شاخص‌های مبتنی بر عملکرد دانه جهت غربال ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی مورد استفاده قرار گیرند. علاوه‌براین، نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های گزینشی محاسبه‌شده بر اساس عملکرد دانه و هر یک از شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش نشان داد شاخص‌های MGIDI و

**References**

- Benakanahalli, N.K., Sridhara, S., Ramesh, N., Olivoto, T., Sreekantappa, G., Tamam, N., Abdelbacki, A.M.M., Elansary, H.O. and Abdelmohsen, S.A.M., 2021. A Framework for Identification of stable genotypes based on MTSI and MGDII indexes: an example in guar (*Cymopsis tetragonoloba* L.). *Agronomy*, 11(6), pp.1221. doi: **10.3390/agronomy11061221**
- Bidinger, F.R., Mahalakshmi, V. and Rao, G.D., 1987. Assessment of drought resistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). II. Estimation of genotype response to stress. *Australian Journal of Agricultural Research*, 38, pp.49–59. doi: **10.1071/ar9870037**
- Bousslama, M. and Schapaugh, W.T., 1984. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*, 24, pp.933–937. doi: **10.2135/cropsci1984.0011183x002400050026x**
- Cai, K., Chen, X., Han, Z., Wu, X., Zhang, S., Li, Q., Nazir, M.M., Zhang, G. and Zeng, F., 2020. Screening of worldwide barley collection for drought tolerance: the assessment of various physiological measures as the selection criteria. *Frontiers in Plant Science*, 11, pp.1159. doi: **10.3389/fpls.2020.01159**
- Dehghani, Z., Nikkiah, H.R. and Frouzesh, P., 2020. Evaluation of drought tolerance in promising barley lines under controlled and field conditions. *Seed and Plant Journal*, 36, pp.161–182. [In Persian]. doi: **10.22077/escs.2023.4986.2096**
- Etminan, A., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Shoshtari, L., Yousefiazarkhanian, M. and Moradkhani, H., 2019. Determining the best drought tolerance indices using artificial neural network (ANN): Insight into application of intelligent agriculture in agronomy and plant breeding. *Cereal Research Communication*, 47, pp.170–181. doi: **10.1556/0806.46.2018.057**
- Fatemi, F., Kianersi, F., Pour-Aboughadareh, A., Poczai, P. and Jadidi, O., 2022. Overview of identified genomic regions associated with various agronomic and physiological traits in barley under abiotic stresses. *Applied Sciences*, 12, pp.5189. doi: **10.3390/app12105189**
- Feiziasl, V., Jafarzadeh, J., Sadeghzadeh, B. and Mousavi Shalmani M.A., 2022. Water deficit index to evaluate water stress status and drought tolerance of rainfed barley genotypes in cold semi-arid area of Iran. *Agricultural Water Management*, 262, pp.107395. doi: **10.1016/j.agwat.2021.107395**
- Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In: Kuo, C.G. (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress, Publication. Tainan, Taiwan.
- Fischer, R.A. and Maurer, R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29, pp.897–912. doi: **10.1071/ar9780897**
- Fischer, R.A. and Wood, T., 1979. Drought resistance in spring wheat cultivars III. Yield association with morphological traits. *Australian Journal of Agricultural Research*, 30, pp.1001–1020. doi: **10.1071/ar9791001**
- Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campalino, R.G., Ricciardi G.L. and Borghi, B., 1997. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of Plant Science*,

- 77, pp.523–531. doi: **10.4141/p96-130**
- Jadidi, O., Etminan, A., Azizi-Nezhad, R., Ebrahimi, A. and Pour-Aboughadareh, A., 2022. Physiological and molecular responses of barley genotypes to salinity stress. *Genes*, 13(11), pp.2040. doi: **10.3390/genes13112040**
- Khalili M., Pour-Aboughadareh, A.R. Naghavi, M.R. and Mohammad Amini, E., 2014. Evaluation of drought tolerance in safflower genotypes based on drought tolerance indices. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 42, pp.214–218. doi: **10.15835/nbha4219331**
- Khalili, M., Naghavi, M.R., Pour-Aboughadareh, A.R. and Talebzadeh, S.J., 2012. Evaluating of drought stress tolerance based on selection indices in spring canola cultivars (*Brassica napus* L.). *Journal of Agricultural Science*, 4, pp.78–85.
- Mitra, J., 2001. Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants. *Current Science*, 80, pp.758–763.
- Mohammadi, R., Armion, M., Kahrizi, D. Amri, A., 2010. Efficiency of screening techniques for evaluating durum wheat genotypes under mild drought conditions. *Journal of Plant Production*, 4(1), pp.11–24. doi: **10.22069/ijpp.2012.677**
- Naghavi, M.R., Pour-Aboughadareh, A.R. and Khalili, M., 2013. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) Cultivars under environmental conditions. *Notulae Scientia Biologicae*, 5, pp.388–393. doi: **10.15835/nsb539049**
- Nouri, A., Etminan, A., Teixeira, D.A., Silva, J.A. and Mohammadi, R., 2011. Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turgidum* var. *durum* Desf.). *Australian Journal of Crop Science*, 5, pp.8–16.
- Olivoto, T. and Lucio, A.D., 2020. Metan: an R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11, pp.783-789. doi: **10.1111/2041-210x.13384**
- Olivoto, T. and Nardino, M. 2020., MGIDI: A novel multi-trait index for genotype selection in plant breeding. *Bioinformatics*, pp.1–22. doi: **10.1101/2020.07.23.217778**
- Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Etminan, A., Shooshtari, L., Maleki-Tabrizi, N. and Poczai, P., 2020. Effects of drought stress on some agronomic and morpho-physiological traits in durum wheat genotypes. *Sustainability*, 12(14), pp.5610. doi: **10.3390/su12145610**
- Pour-Aboughadareh, A., Sanjani, S., Nikkhah-Chamanabad, H., Mehrvar, M.R., Asadi, A. and Amini A.. 2021. Identification of salt-tolerant barley genotypes using multi-traits index and yield performance at the early growth and maturity stage. *Bulletin of the National Research Centre*, 45, pp.1–16. doi: **10.1186/s42269-021-00576-0**
- Pour-Aboughadareh, A., Yousefian, M., Moradkhani, H., Moghaddam Vahed, M., Poczai, P. and Siddique, K.H.M. 2019., iPASTIC: An online toolkit to estimate plant abiotic stress indices. *Applications in Plant Sciences*, 7, pp.e11278. doi: **10.1002/aps3.11278**
- Pour-Aboughadareh, A. and Poczaib, P., 2021a., Dataset on the use of MGIDI index in screening drought-tolerant

- wild wheat accessions at the early growth stage. *Data in Brief*, 36, pp.107596. doi: **10.1016/j.dib.2021.107096**
- Pour-Aboughadareha, A. and Poczaib, P., 2021b. A dataset on multi-trait selection approaches for screening desirable wild relatives of wheat. *Data in Brief*, 39, pp.107541. doi: **10.1016/j.dib.2021.107541**
- Pour-Siahbidi, M.M. and Pour-Aboughadareh, A., 2013. Evaluation of grain yield and repeatability of drought tolerance indices for screening chickpea (*Cicer aritinum* L.) genotypes under rainfed conditions. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2, pp.28–37.
- Reddy, A.R., Chaitanya, K.V. and Vivekananda, M., 2004. Drought induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, 161, pp.1189–1202. doi: **10.1016/j.jplph.2004.01.013**
- Rocha, J.R., Machado, J.C. and Carneiro, P.C.S. 2018. Multitrait index based on factor analysis and ideotype-design: Proposal and application on elephant grass breeding for bioenergy. *Global Change Biology and Bioenergy*, 10, pp.52–60. doi: **10.1016/j.jplph.2004.01.013**
- Rosielle, A.A. and Hambling, J. 1981., Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*, 21, pp.943–946. doi: **10.2135/cropsci1981.0011183x002100060033x**
- Saba, J., Moghaddam, M., Ghassemi, K. and Nishabouri, M.R., 2001. Genetic properties of drought resistance indices. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 3, pp.43–49.
- Sharifi-Alhosseini, M. and Taherian M., 2019., Identification of drought tolerant barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) using drought tolerance indices. *Applied Field Crops Research*, 31, pp.90–105. [In Persian]. doi: **10.22092/aj.2019.121794.1293**
- Silva, M.J., Careiro, P.C.S., Careiro, J.E., Damasceno, C.M.B., Parrella, N.N.L.D., Pastina, M.M., Simeone, M.L.F., Schaffert, R.E. and Parrella, R.A., 2018. Evaluation of the potential of lines and hybrids of biomass sorghum. *Industrial Crops and Products*, 125, pp.379–385. doi: **10.1016/j.indcrop.2018.08.022**
- Singh, L., Park, R.F., Dracatos, P., Ziems, L. and Singh, D., 2021. Understanding the expression and interaction of *Rph* genes conferring seedling and adult plant resistance to *Puccinia hordei* in barley. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 43, pp.218–226. doi: **10.1080/07060661.2021.1936649**
- Sio-se-Mardeh, A., Ahmadi, A., Postini, K. and Mohammadi. V., 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research*, 98, pp.222–229. doi: **10.1016/j.fcr.2006.02.001**
- Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Armion, M., Mehraban, A., Hossein-Pour, T. and Dorri, M., 2017. GGE biplot and AMMI analysis of barley yield performance in Iran. *Cereal Research Communications*, 45, pp.500–511. doi: **10.1556/0806.45.2017.019**
- Wang, X.K., Gong, X., Cao, F.B., Wang, Y.Z., Zhang, G.P. and Wu, F.B., 2019. *HvPAA1* encodes a P-Type ATPase, a novel gene for cadmium accumulation and tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 20, pp.1732. doi: **10.3390/ijms20071732**
- Woyann, L.G., Meira, D., Zdziarski, A.D., Matei, G., Milioli, A.S., Rosa, A.C., Madella, L.A. and Benin, G., 2019. Multiple-trait selection of soybean for biodiesel production in Brazil. *Industrial Crops and Products*, 140,

pp.e111721. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111721

Yan, S., Sun, D. and Sun, G. 2015., Genetic divergence in domesticated and non-domesticated gene regions of barley chromosomes. *PLoS ONE*, 10, pp.e0121106. doi: 10.1371/journal.pone.0121106

Zhao, C.X., Guo, L.Y., Jaleel, C.A., Shao, H.B. and Yang, H.B., 2008. Prospects for dissecting plant-adaptive molecular mechanisms to improve wheat cultivars in drought environments. *Comptes Rendus Biology Journal*, 331, pp.579-586. doi: 10.1016/j.crvi.2008.05.006

## Identification of drought-tolerant genotypes of barley (*Hordeum vulgare* L.) based on selection indices

Shahin Ghavidel<sup>1</sup>, Alireza Pour-Aboughadareh<sup>2\*</sup>, Khodadad Moustafavi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Agronomy and Plant Breeding, Islamic Azad University, Karaj, Iran

<sup>2</sup> Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

\*Corresponding Author: [a.poraboghadareh@gmail.com](mailto:a.poraboghadareh@gmail.com)

Received: 25 October 2022

Accepted: 4 January 2023

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.371176.1294

### Abstract

**Introduction:** Drought stress or water deficit has been known as one of the most important abiotic stresses so it considerably is decreased crop production. Barley (*Hordeum vulgare* L.) is the fourth most important cereal crop in the world after wheat, rice and corn. Among cereals, barley is the most tolerant crop against abiotic stresses and due to this capability is cultivated in a wide range of climates. The objective of the current study was to identify the superior drought-tolerant genotypes using grain yield and several yield-based indices of tolerance and susceptibility by applying various multivariate selection models.

**Materials and Methods:** In the present study a set of promising genotypes of barley including 17 new genotypes along with a Jolge cultivar (as a check) was investigated through two separate experiments based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications at the Cereal research station, Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran during two consecutive growing seasons (2019-2020 and 2020-2021) cropping seasons. After sowing, the number of irrigations was one time in autumn and five times in spring. Drought stress treatment was applied after anthesis, and irrigation was stopped for all stressed plot until seed repining stage. After collecting experimental data and estimating grain yield, several yield-based drought tolerance and susceptible indices were calculated. A heatmap-based correlation method was used to investigate association among calculated indices and grain yield data. Then three selection indices such as multi-trait genotype-ideotype distance index (MGIDI), factor analysis and ideotype design via best linear unbiased prediction (FAI-BLUP), and Smith-Hazel (SH) were exploited to identify the most tolerant-genotypes. All statistical analyses were computed using iPASTIC and R softwares.

**Results and Discussion:** Based on combined analysis of variance for grain yield data showed significant differences for year, environment, and genotype main effects, as well as, the interaction effects for year × genotype, and year × environment × genotype. The result obtained from screening barley genotypes using drought tolerance and susceptible indices revealed good repeatability so that some of the investigated genotypes appeared in the same pattern in each year of experiments. Based on the Spearman's correlation coefficients, grain yields ( $Y_p$  and  $Y_s$ ) positively and significantly correlated with MP, GMP, and STI indices in the first year. In the second year, a positive and significant correlation was observed between grain yields with STI, MP, GMP, and HM indices. Based on the averaged two-year data, grain yields significantly and positively correlated with HM, STI, MP, and GMP indices, supporting the repeatability of our findings. To identify the most tolerant genotypes based on multi-indices, we used three multi-trait selection indices such as MGIDI, FAI-BLUP, and SH. Accordingly, genotypes numbers G7, G9, and G16 for the first year, G4, G13, and G17 for the second year, and three genotypes G7, G13, and G16 over two years were selected as superior genotypes using the MGIDI index. Based on the FAI-BLUP index, the following genotypes were identified as the most tolerant genotypes: G7, G9, and G17 in the first year; G4, G9, and G13 in the second year; G7, G13, and G16 in over two years. The result of screening genotypes using the Smith-Hazel index showed that three sets of genotypes including G4/G7/G13, G13/G14/G16, and G2/G3/G18 were identified as the high-yielding and most tolerant genotypes in each year and



averaged two years, respectively. The venn-plot rendered based on three selection indices revealed that genotype numbers G7 and G13 were superior genotypes in the first and second years.

**Conclusion:** In conclusion, our results indicated that G13 “Comp.Cr229//As46/Pro/3/Srs/4/Express/5/D10\*2” with the highest grain yield in both control and drought stress conditions as well as the best ranking pattern for all drought tolerance indices can be a candidate as a superior drought-tolerant genotype for further studies before commercial introduction.

**Keywords:** Correlation coefficient, Grain yield, MGIDI index, Multivariate models