



"مقاله پژوهشی"

ارزیابی شاخص‌های تحمل به خشکی گیاه سیب‌زمینی در پاسخ به استرس کم آبیاری

زهرا حاجی برات^۱، عباس سعیدی^۱، احمد موسی پور گرجی^۲، محمدرضا غفاری^۳ و مهرشاد زین‌العابدینی^۳

۱- گروه علوم و زیست فناوری گیاه، دانشکده علوم و فناوری زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

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

(نویسنده مسوول: mousapour_gorji@yahoo.com)

۳- گروه زیست‌شناسی سیستم‌ها، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۱۱

صفحه: ۱۰۲ تا ۱۱۲

چکیده

سیب‌زمینی به‌عنوان یک محصول استراتژیک در تامین امنیت غذایی کشور شناخته شده و چهارمین محصول پرمصرف غذایی مردم ایران است. این گیاه به‌دلیل دارا بودن سیستم ریشه‌ای کم‌عمق، حساس به تنش خشکی است. ارزیابی تحمل به خشکی ۲۰ ژنوتیپ سیب‌زمینی در موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در کرج در سال ۱۳۹۷ انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های نواری بر پایه طرح بلوک کاملاً تصادفی با سه تکرار و تحت دو تیمار (تنش کم آبیاری و شاهد) انجام شد. نتایج نشان داد که اثر ساده تیمار ژنوتیپ بر تمامی صفات مورد مطالعه شامل عملکرد کل، عملکرد خوراکی (اندازه غده بزرگتر از ۵۵ میلی‌متر)، عملکرد بذری (اندازه غده بین ۳۵-۵۵ میلی‌متر)، عملکرد قابل فروش (مجموع عملکرد خوراکی و بذری) و عملکرد غیرقابل فروش (اندازه غده کوچکتر از ۳۵ میلی‌متر) در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بودند. در این آزمایش، ۱۱ شاخص تحمل به تنش شامل شاخص تحمل به خشکی (STI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین شاخص عملکرد (MP)، میانگین هارمونیک (HM)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص تحمل (TOL)، شاخص پاسخ به خشکی (DRI)، شاخص تحمل نسبی (RDI)، شاخص تحمل به تنش غیرزیستی (ATI) و درصد شاخص حساسیت به تنش (SSPI) محاسبه شد. همچنین عملکرد غده تحت تنش (Ys) و شرایط نرمال (Yp) برآورد گردید. نتایج حاصل از تجزیه مولفه اصلی و تجزیه خوشه‌ای نشان داد که ژنوتیپ‌های متحمل و حساس در تنش خشکی با الگوی مشابهی در یک گروه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که همبستگی بالا و معنی‌داری بین Yp، MP و Ys وجود دارد. در بین ژنوتیپ‌ها و ارقام مورد بررسی ژنوتیپ‌های ۹۰۲۰۲۷ و ۸۷۰۳-۱ بالاترین میزان MP و GMP را داشتند که نشان‌دهنده تحمل بالای ژنوتیپ‌ها در پاسخ به تنش کم آبیاری بوده است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز همبستگی، تنش کم آبیاری سیب‌زمینی، شاخص‌های تنش، عملکرد کل

مقدمه

دیواره سلولی و غشای سلولی (می‌باشد (۱۲). عملکرد صفتی پیچیده و اغلب توسط چندین ژن کنترل می‌شود و هر ژن دارای اثرات کوچک و تحت تاثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرد. به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا و متحمل به خشکی می‌توان از شاخص‌های تحمل به خشکی استفاده نمود (۱۲) که شامل شاخص تحمل (TOL)، میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص حساسیت استرس (SSI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، شاخص تحمل به استرس (STI)، شاخص پایداری عملکرد (YSI) و شاخص عملکرد برای ارزیابی ژنوتیپ‌ها با عملکرد بالا و تحمل به خشکی می‌باشند (۱۸). تاثیر تنش خشکی بر روی محصول تابعی از ژنوتیپ، شدت و مدت تنش، شرایط آب و هوایی و مراحل رشدی است. تنش آب و درجه حرارت بالا می‌تواند با تاثیرگذاری بر منیع و مخزن برای جذب، عملکرد محصول را کاهش دهند. به‌دلیل کمبود آب در اکثر مناطق خشک، مقاومت گیاهان زراعی در برابر خشکی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و به‌عنوان یکی از اهداف اصلاح نباتات مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، شاخص‌های خشکی که معیاری از تنش خشکی بوده و بیانگر از دست‌دادن عملکرد در شرایط خشکی در مقایسه با شرایط نرمال می‌باشند برای

سیب‌زمینی محصول زراعی مهمی بوده و جایگاه چهارم تولید را در میان محصولات بعد از ذرت، برنج و گندم در سراسر جهان به خود اختصاص داده است (۸). ایران با تولید سالیانه بیش از ۵ میلیون تن جزء ۲۵ کشور برتر تولیدکننده سیب‌زمینی در جهان است (۸). سیب‌زمینی دارای سیستم ریشه‌ای کم‌عمق و حساس به تنش‌های غیرزیستی از جمله خشکی است. خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش عملکرد سیب‌زمینی می‌باشد (۱۸). بیشتر وارثه‌های موجود حساس به تنش خشکی بوده و بنابراین اصلاح برای تحمل به خشکی نقش حیاتی برای جلوگیری از کاهش عملکرد دارد. تنش خشکی باعث تشدید سایر بیماری‌ها از جمله بیماری بلایت سیب‌زمینی شده و همچنین عملکرد و کیفیت غده را کاهش می‌دهد. به‌علاوه کمبود آب باعث کاهش میزان شاخ و برگ (۲۸)، اندازه کانوبی (۲۳)، تعداد برگ، شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه، رشد رویشی و میزان فتوسنتز در سیب‌زمینی شده و در نتیجه، اندازه گیاه و عملکرد غده سیب‌زمینی را کاهش می‌دهد (۲۴). پاسخ گیاهان به کم‌آبی مرتبط با گونه‌ها و ژنوتیپ‌ها، طول دوره و شدت از دست‌دادن آب، سن و مرحله رشدی گیاه و نوع سلول و اندام و اجزای سلول

یاداری عملکرد پیشنهاد کردند. این شاخص میانگین عملکرد تحت شرایط تنش و نرمال در محیط‌های متغیر را محاسبه می‌نماید. به‌علت تغییرات آب و هوای جهانی، انتخاب کولتیبوار^۱ متحمل به خشکی و با عملکرد بالا مهم و ضروری تلقی می‌شود. اثربخشی شاخص‌های انتخاب در تمایز ارقام متحمل با شدت تنش متغیر است. سیب‌زمینی پتانسیل بالایی برای کشت در ایران داشته و به‌عنوان یک محصول استراتژیک برای استفاده اقتصادی از منابع زمین و آب محسوب می‌شود. اهداف این مقاله، شناسایی ژنوتیپ‌های برتر و بررسی شاخص‌های تحمل به خشکی برای تعیین ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به خشکی می‌باشد. همچنین، از دیگر اهداف این مقاله، انتخاب مناسب‌ترین شاخص تحمل به خشکی برای سیب‌زمینی است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش با ۲۰ ژنوتیپ سیب‌زمینی در قالب طرح کرت‌های نواری بر پایه بلوک کاملاً تصادفی در سه تکرار و در تاریخ کشت ۲۰ تیر ماه سال ۱۳۹۷، در مزارع تحقیقاتی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در کرج و میانگین سالیانه بارندگی به‌میزان ۲۵۰ میلی‌متر، با طول جغرافیایی 50° 54' E و عرض جغرافیایی 35° 55' N و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۱۲/۵ متر انجام شد. میزان بارندگی در طول دوره رشد در محل اجرا تقریباً قابل توجه نبود. آبیاری گیاهان در ۱۴ مرحله انجام گردید که دو مرحله اول (جهت استقرار گیاه) برای مراحل تنش و نرمال به‌صورت یکسان انجام شد. مراحل بعدی مدت زمان و میزان آب مصرفی برای تنش نصف میزان آبیاری نرمال لحاظ شد و کنترل میزان آب آبیاری از طریق کنتور نصب‌شده در هر بلوک تنظیم شد. میزان آب مصرفی برای تیمار نرمال ۹۰۰۰ متر مکعب و برای تنش ۴۵۰۰ در نظر گرفته شد. مشخصات ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی در پاسخ به تنش خشکی در جدول (۱) آورده شده است.

غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۷). به‌منظور ارزیابی پاسخ ژنوتیپ‌های گیاهی به خشکی، برخی از شاخص‌های انتخاب بر اساس یک رابطه ریاضی بین تنش و شرایط بهینه پیشنهاد شده است (۲۵). رزلی و همکاران (۲۰) تحمل به تنش (TOL) را به‌عنوان تفاوت در عملکرد بین محیط‌های تنش (Ys) و غیرتنش (Yp) معرفی کردند و میانگین بهره‌وری (MP) به‌عنوان میانگین عملکرد به‌ترتیب تحت شرایط تنش و نرمال Ys و Yp تعریف کردند. فیشر و همکاران (۱۰) شاخص حساسیت به تنش (SSPI) را پیشنهاد نمودند. فرناندز (۹) یک شاخص جدید خشکی (شاخص تحمل تنش = STI) تعریف کردند که می‌تواند برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی که در هر دو شرایط تنش و بدون تنش عملکرد بالا داشته استفاده شود. میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) و شاخص تحمل به تنش (STI) (۹) در شرایط مختلفی به‌کار گرفته می‌شوند. نتایج تحقیقات فیشر و همکاران (۱۰) نشان داد ژنوتیپ‌هایی که با شاخص SSI کمتر از یک واحد باشند، متحمل به خشکی هستند زیرا کاهش عملکرد آنها در شرایط خشکی کوچکتر از میانگین کاهش عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها است. دیگر معیارهای عملکرد براساس تخمین تحمل در برابر خشکی شامل میانگین هارمونیک (HM) و درصد کاهش (RR) (۴) می‌باشند. فیشر و همکاران (۱۹۹۸) اظهار داشتند که شاخص نسبی خشکی (RDI) یک شاخص مثبت برای نشان‌دادن تحمل به تنش است. رزلی و همکاران (۲۱) تحمل به تنش (TOL) را به‌عنوان تفاوت عملکرد بین محیط‌های تنش (Ys) و غیرتنش (Yp) و میانگین بهره‌وری (MP) را به‌عنوان میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش و بدون تنش تعریف کردند. یکی دیگر از شاخص‌های تحمل به خشکی، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) بوده که اغلب توسط به‌نژادگران در مطالعات مربوط به تحمل به خشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا تنش خشکی می‌تواند در محیط‌های مزرعه طی سالها متفاوت باشد (۸). فیشر و همکاران (۸) شاخص حساسیت به تنش (SSPI) را برای اندازه‌گیری

جدول ۱- مشخصات ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی در پاسخ به تنش کم آبیاری

Table 1. Characterization of potato genotypes in response to drought stress

No	Genotype	Origin	No	ژنوتیپ	منشا
۱	۹۰۱۲۲۷	لوتا♀×ساوالان♂	۱۱	۸۰۷۸.۱۳۷	ساوالان♀×کایزر♂
۲	۹۰۲۲۷	لوتا♀×ساوالان♂	۱۲	۱-۸۷۰۲	آگریا♀×ساوالان♂
۳	Hx1	لوتا♀×ساتینا♂	۱۳	۸۷۰۱.۱۲۵	کایزر♀×ساوالان♂
۴	۹۰۹۷۵	لوتا♀×کایزر♂	۱۴	۸۷۰۲.۵	کنیک♀×کایزر♂
۵	۹۰۱۱۷۵	لوتا♀×کایزر♂	۱۵	۸۷۰۷.۲۶	آگریا♀×کایزر♂
۶	۹۰۱۳۷۵	لوتا♀×کایزر♂	۱۶	۸۷۰۸.۳۴۴	ساوالان♀×کایزر♂
۷	۹۰۲۷۵	لوتا♀×کایزر♂	۱۷	۸۷۰۳.۳۴۴	آگریا♀×ساوالان♂
۸	Caesar	Ropta B 1178×Monalisa	۱۸	KSGA۰۷	کایزر♀×کنیک♂
۹	۸۷۰۸.۷	ساوالان♀×کایزر♂	۱۹	KSG۶۱۶	آگریا♀×کایزر♂
۱۰	۸۷۰۷.۸۷	آگریا♀×کایزر♂	۲۰	KSG۳۰۰	کایزر♀×ساوالان♂

گردیدند. جهت کشت غده‌ها، پشته‌هایی به فاصله ۷۵ سانتی‌متر و غده‌ها به فاصله ۲۵ سانتی‌متری از یکدیگر کشت شدند. به‌منظور تامین احتیاجات رشدی گیاه سیب‌زمینی

به‌منظور کنترل علف‌های هرز بعد از کشت و قبل از جوانه زنی گیاهان از سنکور با غلظت ۱ در هزار استفاده شد و در زمان خاکدهی نیز علف‌های هرز به‌صورت مکانیکی حذف

شاخص‌های تحمل به خشکی و فرمول‌های مرتبط با شاخص‌های تحمل در جدول (۲) آورده شده است. محاسبه داده‌ها شامل مولفه‌های اصلی و دیگر پارامترهای مرتبط با تنش خشکی با استفاده از نرم‌افزار Minitab v.16 انجام شد. گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس ضریب فاصله مربع اقلیدسی و به روش Ward با استفاده از میانگین شاخص‌ها برای ژنوتیپ‌ها از شاخص‌های تحمل به تنش شامل (Ys, STI, GMP, MP, Yp, HARM, SSPI, SNPI, DSI) در این مطالعه جهت تفکیک و گروه‌بندی نمودار خوشه‌ای، مکان خط برش با استفاده از روش جذرگیری به روش $\frac{\sqrt{N}}{2}$ مشخص گردید (۲۶).

همبستگی بین شاخص‌های مورد مطالعه و عملکرد غده تحت شرایط تنش و نرمال با استفاده از نرم‌افزار SPSS ver.24 محاسبه شد. در فرمول‌های زیر Yp, Ys و \bar{Yp} و \bar{Ys} به ترتیب عملکرد غده تحت شرایط تنش و نرمال و میانگین عملکرد تحت شرایط نرمال و تنش برای همه ژنوتیپ‌ها می‌باشد (جدول ۲).

به میزان ۲۵۰ کیلوگرم کود اوره و ۲۵۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم و ۱۵۰ کیلوگرم کود فسفات آمونیوم طی مراحل رشدی به خاک اضافه گردید. کود فسفر و پتاس قبل از کشت و کود ازت در سه مرحله انجام شد. یک سوم کود مصرفی قبل از کشت و یک سوم دیگر آن قبل از خاکدهی اول و باقیمانده کوددهی قبل از گلدهی به مزرعه اضافه گردید. کود کامل قبل از گلدهی به صورت محلول‌پاشی و هیومیک اسید در مرحله ۵ برگه و پس از هر مرحله کوددهی به میزان ۴ کیلو در هکتار از طریق سیستم آبیاری انجام شد.

عملکرد و اجزای عملکرد (عملکرد خوراکی با اندازه بزرگتر از ۵۵ میلی‌متر، عملکرد بذری با مقدار بین ۳۵-۵۵ میلی‌متر، عملکرد ریز یا غیرقابل فروش با میزان کمتر از ۳۵ میلی‌متر)، عملکرد قابل فروش تحت شرایط تنش و نرمال یادداشت‌برداری و از میانگین داده‌ها برای محاسبه ضریب همبستگی و شاخص‌های تحمل و حساسیت استفاده شد. شاخص‌های تنش STI, GMP و MP به عنوان بهترین شاخص‌های تحمل به خشکی معرفی شده‌اند (۱۹،۲۴).

آنالیزهای آماری

جدول ۲- شاخص‌های تحمل به تنش مورد استفاده در این مطالعه

Table 2. Stress tolerance indices used in this study

Tolerance indices	Stress tolerance indices	Reference
$RR = ((Y_p - Y_s) / Y_p) \times 10$	Relative Reduction	(۳)
$ATI = [(Y_p - Y_s) / (\bar{Y}_p - \bar{Y}_s)] \times [\sqrt{Y_p \times Y_s}]$	Abiotic Tolerance Index	(۶)
$TOL = Y_p - Y_s$	Stress Tolerance	(۲۰)
$MP = (Y_p + Y_s) / 2$	Mean Productivity	(۲۰)
$STI = (Y_p \times Y_s) / \bar{Y}_p^2$	Stress tolerance index	(۸)
$GMP = \sqrt{Y_s \times Y_p}$	Geometric mean productivity	(۸)
$SSPI = \left[\frac{(Y_p - Y_s)}{2(\bar{Y}_p)} \right] \times 100$	Stress Susceptibility Percentage Index	(۶)
$RDI = [Y_s / Y_p] / [\bar{Y}_s / \bar{Y}_p]$	Stress Non-stress Production Index	(۶)
$HARM = [Y_p \times Y_s] / [Y_p + Y_s]$	Harmonic Mean	(۱۴)
$SNPI = \left[\frac{\sqrt{(Y_p + Y_s)}}{(\bar{Y}_p - Y_s)} \right] \times \left[\sqrt[3]{Y_p \times Y_s^2} \right]$	Relative Drought Index	(۹)
$DSI = [1 - Y_s / Y_p] / [1 - \bar{Y}_s / \bar{Y}_p]$	Drought Susceptibility Index	(۸)

نرمال و کلیه شاخص‌های تحمل به تنش برای تمامی ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). میانگین شاخص Yp, Ys و ATI به ترتیب ۴۴/۱۱، ۲۸/۲۱ و ۲۶/۹۴ بود. شاخص‌های دیگر از جمله TOL، STI و MP به ترتیب ۱۴/۲۰، ۵۹/۰ و ۳۵/۱۸ برآورد گردید. همچنین شاخص GMP، SSPI و SNPI به ترتیب با

نتایج و بحث

در مطالعه حاضر، عملکرد غده در شرایط نرمال (Yp) و تنش (Ys) و ۱۱ شاخص پایداری تحمل به خشکی محاسبه شد (جدول ۳). مقادیر محاسبه‌شده برای شاخص‌ها با توجه به کلیه ژنوتیپ‌ها در جدول ۳ آورده شده است. آنالیز واریانس نشان داد که عملکرد تحت هر دو شرایط تنش کم‌آبی و

بالایی برخوردار بودند. شاخص TOL نشان داد که ژنوتیپ ۹۰۹۲۴ بهترین ژنوتیپ در شرایط تنش خشکی و شرایط نرمال است. از نظر حساسیت به تنش (SSPI) و شاخص نسبی خشکی (RDI) ژنوتیپ‌های ۹۰۸۲۷، ۹۰۹۲۴ و ۹۰۱۱۷۵ متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها بودند. ژنوتیپ‌های ۹۰۲۷۵، ۹۰۳۷۵، ۹۰۵۲۷، ۹۰۶۲۴ و ۹۰۱۳۲۷ برای شاخص تحمل به استرس غیرزیستی (ATI) و درصد شاخص حساسیت به استرس (SSPI) بالاترین مقدار را در بین ژنوتیپ‌ها به خود اختصاص دادند و پایین‌ترین میزان ATI و SSPI مربوط به ژنوتیپ‌های ۹۰۸۲۷، ۹۰۹۲۴، ۹۰۱۱۷۵ و ۹۰۱۲۲۷ بود. Ikeler و همکاران (۱۳) بیان داشتند که مقادیر MP، GMP و STI پارامترهای مناسبی برای انتخاب ژنوتیپ‌های گندم با بازده بالا در شرایط تنش و غیرتنش می‌باشند.

میانگین ۳۵/۲۲، ۱۴/۹۱ و ۹۷/۹۸ اندازه‌گیری شد. میانگین HARM به میزان (۱۶/۸۹) RDI و (۱/۱۳) DSI، (۰/۷۶) و RR (۲۷/۶۲) تعیین گردید. براساس شاخص تحمل به تنش (STI)، عملکرد غده ژنوتیپ‌های ۹۰۲۲۷ و ۹۰۱۱۷۵ بالاترین میزان تحمل به تنش را نشان دادند. در حالی که ژنوتیپ ۹۰۳۲۷ کمترین مقدار STI را نشان داد (جدول ۳). بالاترین GMP و MP مربوط به ژنوتیپ‌های ۹۰۲۲۷ و ۹۰۹۷۵ بود. طبق شاخص تحمل (TOL)، ژنوتیپ‌های ۹۰۹۲۴، ۹۰۱۱۷۵ و ۹۰۱۲۲۷ بیشترین و ژنوتیپ‌های ۹۰۳۷۵ و ۹۰۶۲۴ کمترین تحمل به تنش را به ترتیب نشان دادند. بالاترین سطح HARM مربوط به ژنوتیپ‌های ۹۰۲۲۷، ۹۰۹۷۵ و ۹۰۱۱۷۵ بود.

شاخص‌های MP، GMP و STI نشان دادند که ژنوتیپ‌های ۹۰۲۲۷، ۹۰۹۷۵ و ۹۰۱۱۷۵ از تحمل به خشکی

جدول ۳- شاخص‌های تحمل / مقاومت ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی تحت شرایط تنش و نرمال
Table 3. Resistance/tolerance indices of potato genotypes under stress and non-stress conditions

۱	۹۰۱۲۲۷	۶/۶۷	۴۳/۰۰	۵/۸۰	۲/۴۰	۵/۱۳	-/۷۷	۴۱/۷۸	۲/۵۲	۱۳۵/۱۶	۲۰/۸۸	۱/۴۸	۰/۱۵	۵/۵۸
۲	۹۰۲۲۷	۴۹/۰	۵۳/۰۰	۱۱/۷۸	۴/۰۰	۵۱/۰۰	۱/۱۵	۵۰/۹۶	۴/۲۰	۱۴۸/۰۵	۲۵/۴۶	۱/۴۵	۰/۲۱	۷/۵۵
۳	HxI	۲۶/۰۵	۶۲/۱۰	۸۳/۸۰	۳۶/۰۵	۴۴/۰۸	-/۷۱	۴۰/۲۲	۳۷/۸۷	۴۶/۸۸	۱۸/۳۵	۰/۶۶	۱/۶۰	۸۵/۰۵
۴	۹۰۹۷۵	۱۳/۴۵	۱۹/۴۰	۵/۵۶	۵/۹۵	۱۶/۴۳	-/۱۲	۱۶/۱۵	۶/۲۵	۲۶/۸۶	۷/۹۴	۱/۰۹	۰/۸۴	۳۰/۶۷
۵	۹۰۱۱۷۵	۱۷/۹۰	۶۸/۳۰	۱۰/۱۸۶	۵۰/۴۰	۴۳/۱۰	-/۵۴	۳۴/۹	۵۲/۹۴	۳۳/۴۵	۱۸/۱۴	۰/۴۱	۲/۰۳	۷۳/۷۹
۶	۹۰۱۲۲۷	۲۹/۵۵	۳۳/۱۰	۶/۴۲	۳/۵۵	۳۱/۳۳	-/۴۳	۳۱/۲۷	۳/۲۷	۷۹/۹۰	۱۵/۶۱	۱/۴۰	۰/۳۰	۱۰/۷۳
۷	۹۰۲۷۵	۲۳/۶۰	۶۴/۵۰	۹۲/۲۴	۴۰/۹۰	۴۴/۰۵	-/۶۷	۳۹/۰۲	۴۲/۹۶	۴۲/۶۱	۱۷/۲۸	-/۵۷	۱/۷۴	۶۳/۴۱
۸	Caesar	۳۷/۰	۴۰/۰۰	۶/۶۷	۳/۰۰	۳۸/۵۰	-/۶۷	۳۸/۵۰	۳/۱۵	۱۱۲/۰۲	۱۹/۲۲	۱/۴۵	۰/۲۱	۷/۵۰
۹	۸۷۰۸۷	۸/۴۵	۵۸/۵۰	۶۴/۳۲	۵۰/۰۵	۳۳/۴۸	-/۲۲	۲۲/۲۳	۵۲/۵۷	۱۷/۷۴	۷/۳۸	۰/۲۳	۲/۳۵	۸۵/۵۶
۱۰	۸۷۰۷/۸۷	۴۲/۴۰	۴۴/۲۰	۴/۵۰	۱/۸۰	۴۳/۴۰	-/۸۳	۴۳/۲۹	۱/۸۹	۱۵۶/۳۶	۲۰/۰۴	۱/۵۱	۰/۱۱	۴/۰۷
۱۱	۸۷۰۸/۱۳۷	۴۱/۵۰	۴۱/۸۰	-/۷۲	-/۳۰	۴۲/۶۵	-/۷۷	۴۳/۶۵	-/۳۲	۲۷۱/۳۹	۲۰/۸۲	۱/۵۶	۰/۰۲	-/۷۲
۱۲	۱-۸۷۰۳	۴۳/۳۴	۴۸/۱۰	۱۲/۵۶	۴/۷۶	۴۵/۷۲	-/۹۲	۴۵/۶۶	۵/۰۰	۱۲۰/۱۸	۲۲/۸۰	۱/۴۲	۰/۲۷	۹/۹۰
۱۳	۸۷۰۱/۱۲۵	۲۶/۴۰	۴۷/۷۰	۲۷/۲۲	۱۱/۳۰	۴۲/۰۵	-/۷۷	۴۱/۶۷	۱۱/۸۷	۷۷/۷۷	۲۰/۶۵	۱/۲۰	۰/۶۵	۳۳/۶۹
۱۴	۸۷۰۲/۵	۳۱/۹۰	۳۶/۱۰	۸/۲۴	۴/۲۰	۳۴/۰۰	-/۵۱	۳۳/۹۴	۴/۴۱	۸۴/۱۰	۱۶/۹۴	۱/۳۹	۰/۳۲	۱۱/۶۳
۱۵	۸۷۰۷/۲۶	۱۵/۴۰	۴۹/۲۰	۵۳/۷۸	۳۳/۸۰	۳۲/۳۰	-/۳۳	۲۷/۵۳	۳۵/۳۰	۲۸/۱۵	۱۱/۷۳	۰/۴۹	۱/۸۹	۶۸/۷۰
۱۶	۸۷۰۸/۲۴۴	۴۷/۶۵	۴۸/۰۰	-/۹۷	-/۳۵	۴۳/۳۸	۱/۰۱	۴۷/۸۲	-/۳۷	۳۰/۹۸	۳۳/۹۱	۱/۵۶	۰/۰۲	-/۷۳
۱۷	۸۷۰۳/۲۴۴	۲۵/۶۵	۲۶/۰۰	-/۵۲	-/۳۵	۲۵/۸۳	-/۱۹	۲۵/۸۲	-/۳۷	۱۳۶/۱۶	۱۲/۹۱	۱/۵۵	۰/۰۴	۱/۳۵
۱۸	KSGA-۷	۲۳/۷۵	۲۶/۱۰	۲/۳۸	۲/۳۵	۲۴/۹۳	-/۲۷	۲۴/۹۰	۲/۴۷	۶۷/۸۵	۱۲/۴۳	۱/۴۳	۰/۲۵	۹/۰۰
۱۹	KSG۶۱۶	۱۵/۸۵	۲۸/۴۰	۱۵/۳۹	۱۲/۵۵	۲۲/۱۳	-/۲۰	۲۱/۲۲	۱۳/۱۸	۲۹/۳۰	۱۰/۱۷	۰/۸۸	۱/۲۲	۴۴/۱۹
۲۰	KSG۳۰۰	۲۸/۸۵	۴۴/۸۰	۳۳/۱۵	۱۵/۹۵	۳۰/۸۳	-/۵۷	۳۵/۹۵	۱۶/۷۵	۵۵/۶۳	۱۷/۵۵	۱/۰۱	۰/۹۸	۳۵/۶۰
۱	۹۰۱۲۲۷	۶/۶۷	۴۳/۰۰	۵/۸۰	۲/۴۰	۵/۱۳	-/۷۷	۴۱/۷۸	۲/۵۲	۱۳۵/۱۶	۲۰/۸۸	۱/۴۸	۰/۱۵	۵/۵۸

تنش‌های محدودکننده بهره‌وری محصولات زراعی است (۳). ژنوتیپ‌ها از نظر حساسیت به کمبود آب به دو گروه متحمل یا حساس طبقه‌بندی شدند (۲). براساس پیشنهاد فرناندز (۹) به ضرایب همبستگی بین شاخص‌ها و عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش و نرمال (Yp و Ys) توجه می‌شود. جهت مشخص نمودن ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در سیب‌زمینی، شاخصی که دارای همبستگی معنی‌دار و بالا با عملکردها داشته باشد به‌عنوان بهترین شاخص معرفی می‌شود (۱۷). سیب‌زمینی با کاهش عملکرد و از بین رفتن کیفیت غده به تنش خشکی پاسخ می‌دهد (۲۴). تامین آب کافی در دوره بین شروع تشکیل غده و حجیم‌شدن غده از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، این شرایط سرعت رشد را کاهش می‌دهد (۲۹). رزلی و همکاران (۲۱) گزارش دادند که شاخص‌های تحمل به تنش و میانگین بهره‌وری به‌ترتیب تفاوت در عملکرد و میانگین عملکرد بین شرایط

باتوجه به شاخص مقاومت به خشکی (RDI) و شاخص تولید در شرایط بدون تنش (SNPI) ژنوتیپ‌های ۹۰۲۲۷، ۹۰۲۷۵ و ۹۰۳۷۵ از تحمل به خشکی بالاتری برخوردار بودند. کمترین میزان کاهش نسبی عملکرد (RR) مربوط به ژنوتیپ‌های ۹۰۳۷۵، ۹۰۱۲۷، ۹۰۱۲۷۵، ۹۰۱۰۲۹، ۹۰۵۷۵، ۹۰۹۷۵، ۹۰۱۲۲۷، ۹۰۹۲۴، ۹۰۴۲۴ و ۹۰۵۷۵ بود. در حالی که میزان کاهش نسبی عملکرد (RR)، مقادیر TOL و SSPI شاخص‌های بهتری برای تعیین سطح تحمل به خشکی هستند. در بین ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ ۹۰۲۲۷ می‌تواند در هر شرایطی وزن غده نسبتاً بالایی را در هر گیاه ایجاد کند. عملکرد ژنوتیپ ۹۰۲۲۷ در شرایط نرمال و تنش به‌ترتیب ۵۳ و ۴۹ کیلوگرم در مترمربع است (جدول ۳). امروزه در دنیا بهبود مقاومت یا تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی یکی از اهداف اصلی اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی گیاهی به‌شمار می‌رود. تنش خشکی یکی از رایج‌ترین

تنش دارند. در تحقیقی نشان داده شد که تاثیر شاخص‌های انتخابی به شدت تنش بستگی دارد و این ایده تنها در شرایط تنش متوسط، عملکرد بالقوه تا حدود زیادی بر عملکرد تحت شرایط تنش تأثیر می‌گذارد (۱۲). برای بررسی شاخص‌های تحمل به تنش مناسب برای غربالگری ارقام در شرایط خشکی، عملکرد غده ژنوتیپ‌ها تحت شرایط نرمال و تنش برای محاسبه شاخص‌های مختلف حساسیت و تحمل اندازه‌گیری شد (جدول ۳). براساس شاخص تحمل به تنش ژنوتیپ‌های ۹۰۲۰۲۷، ۸۷۰۳-۱، ۸۷۰۳/۲۴۴ بیشترین مقدار برای شاخص‌های GMP ، MP ، Yp ، Ys ، $SSPI$ ، $SNPI$ ، $HARM$ و RDI از خود نشان دادند. در حالی که ژنوتیپ‌های ۹۰۱۲۲۷، ۹۰۳۳۷، ۹۰۳۲۷، ۹۰۱۲۷۵، ۹۰۱۳۲۷ و ۹۰۱۱۲۴ کمترین مقدار برای این شاخص‌ها را نشان دادند. ژنوتیپ‌های دیگر به عنوان نیمه متحمل یا نیمه حساس به تنش خشکی شناخته شدند (جدول ۳). شاخص $SSPI$ توسط برخی از محققان برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس استفاده می‌گردد (۱۱، ۲۵). بنابراین، طبق نتایج به دست آمده از همبستگی بین شاخص‌ها GMP ، MP ، TOL و به عنوان بهترین شاخص‌ها جهت شناسایی ارقام متحمل به تنش خشکی معرفی شدند. در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، ژنوتیپ‌های ۹۰۲۰۲۷ و ۱-۸۷۰۳ به عنوان ارقام متحمل به شرایط کم‌آبی معرفی گردیدند. به علت اهمیت تنش خشکی، شناسایی مکانیسم‌های مولکولی مقاومت گیاهی با استفاده از ژن‌های مقاومت/ تحمل به خشکی در سیب‌زمینی ضروری بوده تا با انتقال به کولتیوارهای سیب‌زمینی باعث تحمل این گیاهان به تنش خشکی شود. با توجه به متفاوت بودن منشا ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی، این ژنوتیپ‌ها احتمالاً دارای آلل‌های متنوعی برای تحمل به خشکی هستند (۴).

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین

نتایج نشان داد که اثر ساده تیمار ژنوتیپ بر تمامی صفات مورد مطالعه شامل عملکرد، عملکرد خوراکی، عملکرد بذری، عملکرد غیرقابل فروش و عملکرد قابل فروش در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بودند. اثر ساده تیمار آبیاری بر صفت عملکرد در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. در تحقیقی نشان داده شد که ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی در شرایط تنش خشکی عملکرد غده سالم قابل فروش در اکثر ژنوتیپ‌ها تحت شرایط تنش کاهش یا تمایل به کاهش داشت که با نتایج مطالعه ما مطابقت داشت (۲۲، ۲۷).

تنش و شرایط غیرتنش تعریف شده است. در بیشتر مطالعات برای بررسی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی از شاخص‌هایی با میزان بالا STI ، MP ، GMP ، Yp ، Ys و میزان پایین شاخص TOL و SSI استفاده می‌شود. ایکلر و همکاران (۱۳) به این نتیجه رسیدند که مقادیر MP ، GMP و STI پارامترهای مناسبی برای انتخاب ژنوتیپ‌های گندم با بازده بالا در شرایط تنش و غیرتنش هستند در حالی که کاهش نسبی عملکرد، مقادیر TOL و $SSPI$ شاخص‌های بهتری برای تعیین تحمل به خشکی هستند.

در مطالعه‌ای نشان داده شد که ژنوتیپ‌هایی که دارای میزان بالای STI باشند معمولاً در دو شرایط مختلف از نظر عملکرد اختلاف زیادی دارند (۱۷). همچنین ژنوتیپ‌هایی که از نظر پارامترهای GMP ، MP و همچنین STI مشابه باشند نشان‌دهنده این است که این سه پارامتر برای غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی یکسان هستند (۱۷). گل‌آبادی و همکاران (۱۱) گزارش کردند که انتخاب بر اساس شاخص TOL زمانی ارزشمند است که محیط مورد هدف تحت تنش خشکی نباشد (۱۱). شاخص‌های ATI یا $SSPI$ ژنوتیپ‌ها را براساس پایداری عملکرد انتخاب می‌کنند. زمانی که انتخاب براساس شاخص $SNPI$ به دو شاخص عملکرد تحت شرایط نرمال و تنش (برای عملکرد غده تحت شرایط نرمال و تنش بالا) باشد همبستگی معنی‌دار با عملکرد دانه در هر دو شرایط (تنش و نرمال) ضروری است (۱۷). بالاترین همبستگی مثبت بین DSI و RR و بین STI و GMP مشاهده شد، در حالی که بیشترین همبستگی منفی بین DSI و RR و همچنین بین DSI و RDI مشاهده شد. اهدایی و همکاران (۶) دریافتند که در گندم بین شاخص‌های حساسیت به تنش و عملکرد در شرایط نرمال همبستگی وجود ندارد. عملکرد در شرایط نرمال (Yp) با Ys ، TOL ، MP ، GMP ، STI ، RDI ، Yp و YSI و $SSPI$ به طور معنی‌داری همبستگی مثبت نشان داد. این شاخص‌ها برای شناسایی کولتیوارهای با عملکرد بالا تحت شرایط مختلف مفید هستند. محرابی و همکاران (۱۶) هیبریدهای ذرت با عملکرد بالا را براساس شاخص‌های GMP و STI پیشنهاد کردند (۱۶). در گزارشی ارائه شد که همبستگی بین Yp و Ys ، GMP ، MP و Yp معنی‌دار و مثبت بود. خلیلی و همکاران (۱۴) گزارش دادند که GMP ، MP و STI همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد تحت شرایط

جدول ۴- تجزیه واریانس ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی در شرایط نرمال و تنش کم‌آبیاری

Table 4. Analysis of variance potato genotypes under normal and water deficit conditions

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد	عملکرد خوراکی	عملکرد بذری	عملکرد غیر قابل فروش	عملکرد قابل فروش
(تیمار آبیاری) A	۱	۶۸/۴۰۰*	۰/۰۱	۰/۶۷۱	۰/۱۳۷	۰/۱۳۲
Rep	۲	۰/۴۳	۰/۰۴۸	۰/۱۰۹	۰/۰۱۷	۰/۳۰۴
خطای عامل اصلی E(a)	۲	۰/۱۱۳	۰/۱۷	۰/۳۱۴	۰/۰۰۸	۰/۹۸۴
(تیمار ژنوتیپ) B	۹	۱۰/۱۴***	۱/۰۱***	۱/۹۸***	۰/۴۸۱***	۵/۸۴**
خطای عامل فرعی E(b)	۳۸	۱/۳۴۲	۰/۱۴۸	۰/۲۸۸	۰/۰۰۴۴	۰/۸۴۷
A*B	۱۹	۰/۸۳۵	۱/۱۰۹***	۲/۱۵***	۰/۴۵۰***	۶/۳۴***
Error	۳۸	۰/۴۶۳	۰/۲۱۷	۰/۳۹۷	۰/۰۰۸	۱/۱۹۷
Total	۱۱۹					

ژنوتیپ KSG616 و در شرایط تنش کم آبی بیشترین عملکرد خوراکی مربوط به ژنوتیپ ۹۰۱۱۷۵ با مقدار ۲۶/۲ کیلوگرم در مترمربع بود و کمترین عملکرد خوراکی در شرایط تنش مربوط به ژنوتیپ KSG300 به میزان ۰/۲ کیلوگرم در مترمربع بود (جدول ۵).

بررسی نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ژنوتیپ و اثر متقابل بین ژنوتیپ و تیمار آبیاری در سطح ۱٪ برای صفات عملکرد خوراکی، عملکرد بذری، عملکرد ریز و عملکرد قابل فروش معنی‌دار شدند (جدول ۴). بیشترین عملکرد خوراکی در شرایط بدون تنش مربوط به ژنوتیپ ۹۰۲۷۵ با مقدار ۲/۳۵ کیلوگرم در متر مربع بود و کمترین عملکرد خوراکی مربوط به

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح تیماری تنش کم آبی و ژنوتیپ بر عملکرد غده

Table 5. Interaction effects of water deficit and genotype on tuber yield

تیمار آبیاری	ژنوتیپ	میانگین عملکرد خوراکی	میانگین عملکرد بذری	میانگین عملکرد غیرقابل فروش	میانگین عملکرد قابل فروش
نرمال	۹۰-۱۲۲۷	۰/۴۷ ^{efg}	۰/۴۸ ^{efg}	۰/۱۱۵ ^{de}	۱/۱۷۵ ^{fg}
	۹۰-۲۲۷	۱/۰۵ ^{efg}	۱/۰۵ ^{efg}	۰/۲۳ ^{de}	۴۴/۳ ^{efg}
	Hx1	۰/۶۶ ^{efg}	۰/۶۶ ^{d-g}	۰/۱۳ ^{cde}	۵۶/۱ ^{efg}
	۹۰-۹۷۵	۰/۶۴ ^{efg}	۰/۶۴ ^{efg}	۰/۱۵ ^{de}	۵۶/۱ ^{efg}
	۹۰-۱۱۷۵	۰/۵۳ ^{efg}	۰/۵۳ ^{d-g}	۰/۰۸۵ ^{de}	۱/۲۹ ^{efg}
	۹۰-۱۲۷۵	۱/۶۱ ^{efg}	۱/۱۶ ^{efg}	۰/۲۰۵ ^{de}	۷۷/۳ ^{efg}
	۹۰-۲۷۵	۲/۳۶ ^a	۲/۳۶ ^{ab}	۰/۴۵ ^{abc}	۵/۶ ^a
	Caesar	۱/۷ ^{efg}	۱/۵۸ ^{efg}	۰/۳۳ ^{cde}	۳/۷۶ ^{efg}
	۸۷-۸/۷	۱/۴۵ ^{efg}	۱/۴۵ ^{efg}	۰/۲۷ ^{de}	۳/۴۹ ^{efg}
	۸۷-۱/۸۷	۱/۵۸ ^{efg}	۱/۵۸ ^{efg}	۰/۳۶ ^{de}	۳/۸ ^{efg}
	۸۷-۸۱/۳۷	۰/۷۳ ^{efg}	۰/۷۳ ^{efg}	۰/۱۴ ^{de}	۱/۷۱ ^{efg}
	۱-۸۷-۳	۱/۵۷ ^{efg}	۱/۵۷ ^{efg}	۰/۳۱ ^{de}	۳/۸۸ ^{efg}
	۸۷-۱/۱۲۵	۱/۷۱ ^{efg}	۱/۷۱ ^{efg}	۰/۳۰ ^{de}	۴/۰۷ ^{efg}
	۸۷-۲/۵	۱/۹۹ ^{cde}	۱/۹۹ ^{cde}	۰/۳۶ ^{de}	۴/۹۵ ^{cde}
	۸۷-۷/۲۶	۱/۸ ^{def}	۱/۸۱ ^{def}	۰/۳۶ ^{de}	۳/۳۴ ^{def}
	۸۷-۸/۲۴۴	۱/۰۳ ^{efg}	۱/۰۳ ^{efg}	۰/۱۹ ^{cde}	۲/۴۵ ^{efg}
	۸۷-۳/۲۴۴	۱/۶۱ ^{efg}	۱/۱۶ ^{efg}	۰/۱۸ ^{cde}	۲/۳۷ ^{efg}
	KSG۸-۷	۰/۵۳ ^{efg}	۰/۵۳ ^{efg}	۰/۱۳ ^{cde}	۱/۳ ^{efg}
	KSG۶۱۶	۰/۴۴ ^{efg}	۰/۴۴ ^{efg}	۰/۱۳ ^{cde}	۱/۰۷ ^{efg}
	KSG۳۰۰	۰/۴۵ ^{d-g}	۰/۴۴ ^{efg}	۰/۰۷ ^{de}	۱/۰۹ ^{efg}
تنش کم آبی	۹۰-۱۲۲۷	۱/۳۹ ^{efg}	۱/۳۹ ^{efg}	۰/۳۱ ^{cde}	۳/۳۰ ^{efg}
	۹۰-۲۲۷	۱/۸۳ ^{def}	۱/۸۳ ^{def}	۰/۳۸ ^{bcd}	۴/۱۸ ^{d-g}
	Hx1	۲/۱۱ ^{bcd}	۲/۱۱ ^{cde}	۰/۳۶ ^{cde}	۵/۰۵ ^{abc}
	۹۰-۹۷۵	۲/۱۵ ^{abc}	۲/۱۶ ^{bc}	۰/۴۳ ^{abc}	۵/۱۸ ^{abc}
	۹۰-۱۱۷۵	۲/۲۶ ^{ab}	۲/۲۶ ^{ab}	۰/۵۷ ^a	۵/۲۹ ^{ab}
	۹۰-۱۲۷۵	۱/۲۳ ^{efg}	۱/۲۳ ^{efg}	۰/۳۱ ^{cde}	۲/۹۷ ^{efg}
	۹۰-۲۷۵	۱/۳۹ ^{efg}	۱/۳۹ ^{efg}	۰/۳۶ ^{cde}	۳/۳ ^{efg}
	Caesar	۰/۸۳ ^{efg}	۰/۸۳ ^{efg}	۰/۱۶ ^{cde}	۱/۹۸ ^{efg}
	۸۷-۸/۷	۰/۹۱ ^{efg}	۰/۹۱ ^{efg}	۰/۱۸ ^{cde}	۲/۳ ^{efg}
	۸۷-۷/۸۷	۰/۸ ^{efg}	۰/۸ ^{efg}	۰/۱۸ ^{cde}	۱/۹۵ ^{efg}
	۸۷-۸/۱۳۷	۰/۵۳ ^{d-g}	۰/۵۳ ^{d-g}	۰/۰۹ ^{de}	۱/۲۶ ^{efg}
	۱-۸۷-۳	۱/۴۳ ^{efg}	۱/۴۳ ^{efg}	۰/۳۴ ^{cde}	۲/۴۳ ^{efg}
	۸۷-۱/۱۲۵	۱/۰ ^{efg}	۱/۰ ^{efg}	۰/۱۸ ^{cde}	۲/۴۱ ^{efg}
	۸۷-۲/۵	۰/۸۵ ^{efg}	۰/۸۵ ^{efg}	۰/۲۱ ^{cde}	۲/۰۴ ^{efg}
	۸۷-۷/۲۶	۱/۰۳ ^{efg}	۱/۰۳ ^{efg}	۰/۲۴ ^{cde}	۲/۴۳ ^{efg}
	۸۷-۸/۲۴۴	۱/۴۳ ^{efg}	۱/۲۴ ^{efg}	۰/۲۳ ^{cde}	۲/۸۴ ^{efg}
	۸۷-۳/۲۴۴	۰/۶۷ ^{bcd}	۰/۶۷ ^{efg}	۰/۱۵ ^{cde}	۱/۶۳ ^{efg}
	KSG۸-۷	۰/۲۹ ^{efg}	۰/۲۹ ^{efg}	۰/۰۷ ^{de}	۰/۶۷ ^{efg}
KSG۶۱۶	۰/۴۴ ^{efg}	۰/۴۴ ^{efg}	۰/۰۸ ^{de}	۱/۲۵ ^{efg}	
KSG۳۰۰	۰/۲ ^g	۰/۲ ^g	۰/۰۶ ^e	۰/۴۹ ^g	

میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال آماری ۵٪ با هم ندارند.

در شرایط بدون تنش متعلق به ژنوتیپ ۹۰۲۷۵ به میزان ۵/۶۰ کیلوگرم در متر مربع و کمترین عملکرد قابل فروش مربوط به ژنوتیپ‌های KSG616 با میزان ۱/۰۷ کیلوگرم در متر مربع بودند. در شرایط تنش کم آبی بیشترین و کمترین عملکرد قابل فروش مرتبط به ژنوتیپ‌های ۹۰۱۱۷۵ و KSG300 به ترتیب با میزان ۵/۳۹ کیلوگرم در متر مربع و ۰/۴۹ کیلوگرم در متر مربع اختصاص یافت. بیشترین عملکرد غیرقابل فروش

بیشترین عملکرد بذری در شرایط بدون تنش متعلق به ژنوتیپ ۹۰۲۷۵ با مقدار ۲/۳۶ کیلوگرم در متر مربع و پایین‌ترین عملکرد بذری متعلق به ژنوتیپ KSG616 با مقدار ۰/۴۴ کیلوگرم در متر مربع بود. در شرایط تنش کم آبی بیشترین و کمترین عملکرد بذری به ژنوتیپ‌های ۹۰۱۱۷۵ و KSG300 به ترتیب با میزان ۲/۲۶ و ۰/۲ کیلوگرم در متر مربع اختصاص یافت (جدول ۵). بیشترین عملکرد قابل فروش

همبستگی بین STI و GMP به میزان ۰/۹۸۹ بوده و علاوه بر این بیشترین همبستگی منفی بین RR و RDI و همچنین DSI و RDI به میزان ۱/۰- مشاهده شد. همبستگی معنی‌داری بین Yp و Ys مشاهده نشد اما همبستگی بالا و معنی‌داری بین MP با Yp به میزان ۰/۶۲۱ مشاهده شد. شاخص Ys با TOL همبستگی منفی و معنی‌داری به میزان ۰/۵۱۱- و همچنین همبستگی بین Ys با SSPI به مقدار ۰/۵۱۱- محاسبه شد. همبستگی بین Ys با RR به میزان ۰/۶۱۳- تعیین و میزان همبستگی بین Ys با DIS ۰/۶۱۲- نشان داده شد. همبستگی شاخص Yp با ATI به میزان ۰/۷۹۳ و همبستگی Yp با TOL به مقدار ۰/۷۲۵ برآورد گردید. همچنین شاخص Yp با MP همبستگی معنی‌دار و مثبت ۰/۶۲۱ و همبستگی Yp با STI به مقدار ۰/۴۷۷ تعیین گردید. آنالیز همبستگی Yp با GMP به مقدار ۰/۵۱۴ و همبستگی Yp با SSPI به میزان ۰/۷۲۵ برآورد گردید. در نهایت همبستگی Yp با DSI به مقدار ۰/۵۶۶ و همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین Yp با RR به میزان ۰/۵۶۶ برآورد گردید. شاخص Yp با شاخص RDI همبستگی منفی و معنی‌داری به میزان ۰/۵۶۸- نشان داد (جدول ۶). دندوگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای به روش Ward برای ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی در شکل (۱) آورده شده است.

در شرایط بدون تنش مربوط به ژنوتیپ ۹۰۲۷۵ با مقدار ۰/۴۵ کیلوگرم در متر مربع بود. کمترین عملکرد غیرقابل فروش در شرایط تنش متعلق به ژنوتیپ KSG300 با مقدار ۰/۰۷ کیلوگرم در متر مربع بود و در شرایط تنش کم‌آبی بیشترین عملکرد غیرقابل فروش مربوط به ژنوتیپ ۹۰۱۱۷۵ با مقدار ۰/۵۷ کیلوگرم در متر مربع بود و کمترین عملکرد غیرقابل فروش در شرایط تنش مربوط به ژنوتیپ KSG300 با میزان ۰/۰۶ کیلوگرم در متر مربع بود (جدول ۵).

آنالیز همبستگی و تجزیه کلاستر

برای تعیین بهترین شاخص‌های تحمل به خشکی، ضریب همبستگی بین Yp، Ys و دیگر شاخص‌های کمی تحمل به خشکی محاسبه گردید. به عبارت دیگر، آنالیز همبستگی بین عملکرد غده در شرایط نرمال و تنش و شاخص‌های تحمل به خشکی می‌تواند معیار خوبی برای غربالگری بهترین ارقام و شاخص‌های مورد استفاده باشد (جدول ۷). همبستگی شاخص Ys با MP به میزان ۰/۷۴۲ و همبستگی Ys با GMP به مقدار ۰/۷۳۲ برآورد گردید. همچنین شاخص Ys با STI همبستگی معنی‌دار و مثبت ۰/۷۴۹ و همبستگی Ys با HARM به مقدار ۰/۷۹۲ تعیین گردید. و در نهایت همبستگی Ys با RDI به مقدار ۰/۶۱۳ و همبستگی Ys با SNPI به میزان ۰/۶۷۸ برآورد گردید (جدول ۶). بالاترین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین DSI و RR به مقدار ۱/۰ برآورد شد و

جدول ۶- آنالیز همبستگی بین شاخص‌های تحمل به خشکی و عملکرد

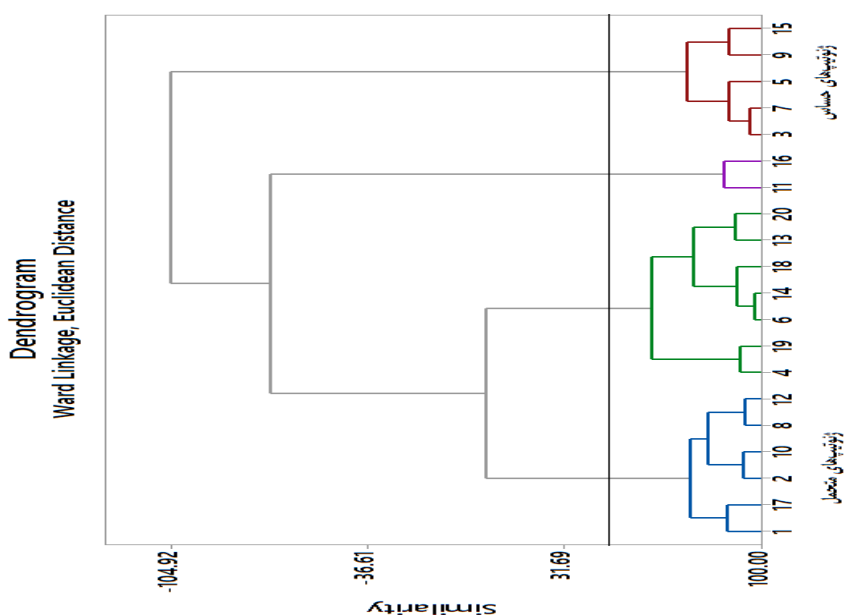
Table 6. Correlation analysis between drought tolerance indices and yield

Correlations	Ys	Yp	ATI	TOL	MP	STI	GMP	SSPI	SNPI	HARM	RDI	DSI	RR
Ys	۱												
Yp	۰/۰۶۸	۱											
ATI	-۰/۳۸۹	۰/۷۹۳**	۱										
TOL	-۰/۵۱۱*	۰/۷۲۵**	۰/۹۵۹**	۱									
MP	۰/۷۴۲**	۰/۶۲۱**	۰/۳۹۸	۰/۱۹۵	۱								
STI	۰/۷۴۹**	۰/۴۷۷*	-۰/۰۹۲	-۰/۲۴۹	۰/۶۳۳**	۱							
GMP	۰/۷۳۲**	۰/۵۱۴*	-۰/۰۴۵	-۰/۲۱۴	۰/۶۴۱**	۰/۹۸۹**	۱						
SSPI	-۰/۵۱۱*	۰/۷۲۵**	۰/۹۵۹**	۱/۰۰۰**	۰/۱۹۵	-۰/۲۴۹	-۰/۲۱۳	۱					
SNPI	۰/۶۷۸**	-۰/۰۶۸	-۰/۰۵۴۶*	-۰/۵۹۷*	۰/۳۹۵	۰/۶۳۶**	۰/۶۱۳**	-۰/۵۹۷**	۱				
HARM	۰/۷۹۲**	۰/۳۱۳	-۰/۲۴۶	-۰/۴۱۹	۰/۵۵۱*	۰/۹۷۳**	۰/۹۷۵**	-۰/۴۱۹	۰/۶۸۳**	۱			
RDI	۰/۶۱۳**	-۰/۵۶۸**	-۰/۸۸۷**	-۰/۹۶۵**	-۰/۰۵۸	۰/۴۰۶	۰/۳۸۶	-۰/۹۶۵**	۰/۷۰۵**	-۰/۵۶۸**	۱		
DSI	-۰/۶۱۳**	۰/۵۶۶**	۰/۸۸۷**	۰/۹۶۴**	۰/۰۵۸	-۰/۴۰۹	-۰/۳۸۸	۰/۹۶۴**	-۰/۷۰۶**	-۰/۵۶۹**	-۱/۰۰۰**	۱	
RR	-۰/۶۱۳**	۰/۵۶۶**	۰/۸۸۷**	۰/۹۶۴**	۰/۰۵۸	-۰/۴۰۸	-۰/۳۸۸	۰/۹۶۴**	-۰/۷۰۵**	-۰/۵۶۹**	-۱/۰۰۰**	۱/۰۰۰**	۱

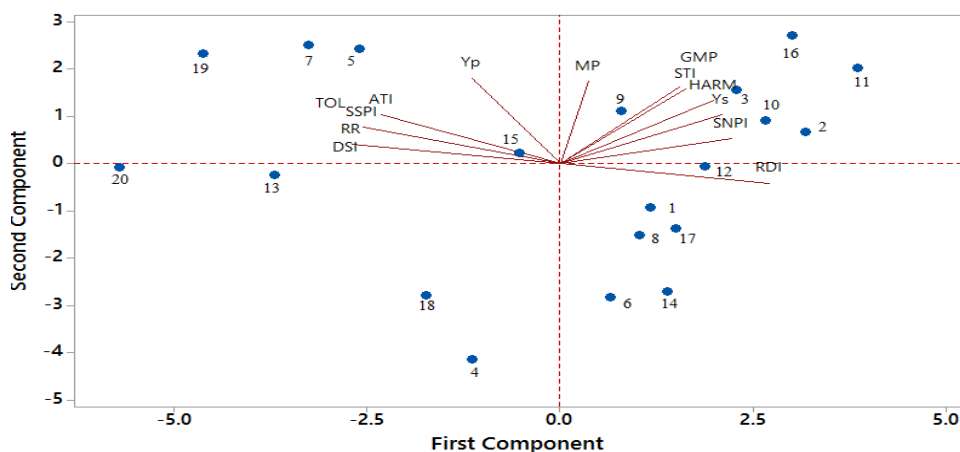
* و **: به ترتیب تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد

شاخص‌ها، حساس به خشکی بودند. زاویه تند در بین شاخص‌ها، نشانگر همبستگی بالا بین آنها می‌باشد (شکل ۲). در نمودار بای‌پلات زاویه تند بین شاخص‌های TOL و SSPI نشان‌دهنده همبستگی بالا بین این شاخص‌ها می‌باشد و همچنین شاخص GMP و STI نیز همبستگی بالایی با یکدیگر داشتند (۱۹).

کلاستر اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب شامل ۶، ۷، ۲ و ۵ ژنوتیپ سیب‌زمینی بود. متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها در کلاستر اول قرار داشتند. ژنوتیپ‌های ۹۰۱۲۲۷، ۹۰۲۰۲۷، Caesar، ۸۷۰۳، ۸۷۰۷، ۸۷۰۳، ۸۰۴/۸۷۰۳ از نظر شاخص‌های تحمل MP، GMP، TOL و RR متحمل به خشکی بودند. ژنوتیپ‌های ۹۰۱۱۷۵، Hx1، ۹۰۲۷۵، ۲۶/۸۷۰۷، ۷/۸۷۰۸ و KSG616 در کلاستر چهارم قرار داشتند و از نظر این



شکل ۱- تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی به روش Ward بر اساس شاخص‌های تحمل به خشکی
Figure 1. Cluster analysis of potato genotypes with Ward method based on drought tolerance indicators



شکل ۲- آنالیز بای پلات مولفه‌های اصلی برای ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی و شاخص‌های تحمل به تنش خشکی
Figure 2. Biplot analysis of the main components of potato genotypes and indicators of drought tolerance

عملکرد پایین و حساس جدا نماید. ژنوتیپ‌های انتخاب‌شده بر اساس این مولفه دارای مقدار TOL و SSPI پایین هستند. دومین مولفه (PC2) دارای ۳۲ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه کرد. در یک تحقیق با استفاده از تجزیه به مولفه‌های اصلی، دو مولفه اصلی شناسایی شدند که مولفه اول ۸۱ درصد از تغییرات کل را تبیین کرد و با همدیگر همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت و شاخص‌های Yp، MP، STI و Ys مولفه پتانسیل عملکرد و تحمل به خشکی نامیده شد. مولفه دوم حدود ۱۴ درصد از تغییرات کل را تبیین کرد. بطور کلی می‌توان این نوع از توزیع ژنوتیپ‌ها در فضای بای‌پلات را مرتبط با وجود تنوع ژنتیکی ژنوتیپ‌ها نسبت به خشکی دانست. عملکرد در شرایط تنش با HARM، GMP، RDI، MP، SSPI و TOL همبستگی بالایی نشان

ارتباط بین شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی در بای‌پلات با دو مولفه اصلی در شکل ۲ نشان داده شده است. مولفه‌های اول و دوم در مجموع ۹۱ درصد از کل تغییرات را توجیه می‌کنند. در بای‌پلات ترسیمی، ژنوتیپ‌ها در گروه‌های مشخصی قرار گرفتند که مرتبط با میانگین عملکرد و تحمل آن‌ها به تنش خشکی است. براساس نتایج مولفه اول درصد بالایی (۵۹ درصد) از تغییرات را توجیه می‌نماید. این مولفه همبستگی مثبت و نسبتاً بالایی را با عملکرد در شرایط تنش و همچنین شاخص‌های مرتبط با عملکرد STI، HARM، Yp، Ys، MP و GMP دارد و بنابراین، این مولفه به‌عنوان مولفه پتانسیل عملکرد در شرایط تنش کم‌آبی معرفی می‌شود و قادر است ژنوتیپ‌های دارای پتانسیل عملکرد بالا و متحمل به تنش کم‌آبی را از ژنوتیپ‌های با

انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل بر اساس ترکیبی از شاخص‌های تحمل می‌تواند معیارهای مفیدی برای مقاومت در برابر خشکی سیب‌زمینی فراهم کند. همبستگی بالای مثبت و معنی‌داری بین Y_p ، MP و Y_s مشاهده شد که نشان‌دهنده‌ی این است که این شاخص‌ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی اثربخش هستند. این نتایج به انتخاب غیرمستقیم ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف کمک می‌نماید. به‌طور کلی ژنوتیپ‌های ۹۰۲۰۲۷، ۹۰۱۱۷۵ و ۸۷۰۳-۱ متحمل به خشکی بودند و می‌توان برای برنامه‌های اصلاحی سیب‌زمینی مورد استفاده قرار گیرند.

داد. نتایج مشابهی توسط سایر محققین بر اساس روش ترسیمی بای‌پلات گزارش شده است (۲۰،۲۷). با توجه به رابطه بین مولفه‌ها و شاخص‌های بررسی‌شده، ژنوتیپ‌های ۹۰۱۲۲۷، ۹۰۱۲۷۵، Caesar، ۸۷۰۳-۱، ۸۷۰۲/۵ و ۸۷۰۳/۸۰۴ که در ناحیه پایین و سمت راست نمودار قرار گرفتند به‌عنوان ژنوتیپ‌های پایدار در تنش خشکی و ناحیه بالا و سمت چپ نمودار قرار گرفتند به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس به خشکی شناسایی شدند (شکل ۲). نتایج حاصل از تجزیه مولفه اصلی و تجزیه خوشه‌ای نشان داد که ژنوتیپ‌های متحمل و حساس در تنش خشکی با الگوی مشابهی در یک گروه قرار گرفتند.

منابع

1. Agahi, K., M.H. Fotokian and Z. Younesi. 2012. Study of genetic diversity and important correlations of agronomic traits in rice genotypes (*Oryza sativa* L.). Iranian Journal of Biology, 25 (1): 97-110 (In Persian).
2. Cabello, R., P. Monneveux, F. De Mendiburu and M. Bonierbale. 2013. Comparison of yield-based drought tolerance indices in improved cultivars, genetic stocks, and landraces of potato (*Solanum tuberosum* L.). Euphytica, 193:147-156. Doi: 10.1007/s10681-013-0887-1
3. Chaves, M.M., J.P. Maroco and J.S. Pereira. 2003. Understanding plant responses to drought: from genes to the whole plant. Funct. Plant Biol, 30: 239-264. doi: 10.1071/FP02076.
4. Choukan, R., T. Taherkhani, M.R. Ghannadha and M. Khodarahmi. 2006. Evaluation of drought tolerance maize lines by drought stress tolerance indices. Iranian Journal of Agricultural Science, 8: 2000-2010.
5. Eftekhari, A., A. Baghizadeh, R. Abdshahi and M.M. Yaghubi. 2020. Evaluation of Grain Yield, Agronomical Traits and Drought Tolerance Indices in Some Bread Wheat Cultivars. Journal of Crop Breeding, 11: 32 (In Persian).
6. Ehdai B., R.W. Whitkusb and J.G. Wainesa. 2003. Root biomass, water-use efficiency, and performance of wheat-rye translocations of chromosomes 1 and 2 in spring bread wheat 'Pavon'. Crop Science, 43: 710-717.
7. Farshadfar, E. and J. Sutka. 2002. Multivariate analysis of drought tolerance in wheat substitution lines. Cereal Res, Commun, 31: 33-39.
8. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018. FAOSTAT statistical database. FAO, Rome. Available from internet: <http://www.fao.org>.
9. Fernandez, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress Tolerance. Asian Vegetable Research and Development Centre, Taiwan, 257-270.
10. Fischer, R.A. and R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars, I. Grain yield responses. Australian Journal of Agricultural Research, 29: 897-912.
11. Golabadi, M., A. Arzani and S.A.M. Mirmohammadi Maibody. 2006. Assessment of drought tolerance in segregating populations in durum wheat. In: African Journal of Agricultural Research, 1(5): 162-171 (In Persian).
12. Jones, H.G. 2014. Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology. Cambridge: Cambridge University Press.
13. Ilker, E., O. Tatar, F.A. Aykut Tonk and M. Tosun. 2011. Determination of Tolerance Level of Some Wheat Genotypes to Post Anthesis Drought. Turkish Journal of Field Crops, 16(1): 59- 63.
14. Khalili, M., M.R. Naghavi, A.P. Aboughadareh and S.J. Talebzadeh. 2012. Evaluating of drought stress tolerance based on selection indices in spring canola cultivars (*Brassica napus* L.). Journal of Agricultural Science, 4(11): 78 (In Persian).
15. Kristin, A.S., R.R. Serna, F.I. Perez, B.C. Enriquez and J.A.A. Gallegos. 1997. Improving common bean performance under drought stress. Crop Science, 37: 51-60.

16. Mehrabi, P., H. Homayoun and M.S. Daliri. 2011. Study of drought tolerance of corn genotypes using STI index. *Middle-East Journal Science Res Research*, 9(1): 68-70 (In Persian).
17. Mitra, J. 2001. Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants. *Current Science*, 80: 758-763.
18. Mousavi, S.S., S.B. Yazdi, M.R. Naghavi, A.A. Zali, H. Dashti and A. Pourshahbazi. 2008. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. *Desert*, 12(2): 165-178.
19. Noormandmoayed, F., M. Rostami and M. Ghanadha. 2001. Evaluation of drought resistance indices in wheat. *Iranian Journal of Crop Science*, 32(4): 795-805 (In Persian).
20. Nouri, A., A.A.D. Etminan, T. Jaime, Da. Silva and R. Mohammadi. 2011. Assessment of yield, Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Front. Plant Science*, 6(542): 1-23. doi: 10.3389/fpls.2015.00542.
21. Rosielle, A.A. and J. Hamblin. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. *Crop science*, 21(6): 943-946.
22. Samaee, M., S.S.A.M. Modarres, G.A. Mousapour and E. Zand. 2016. Water use efficiency and water productivity in potato genotypes under water stress conditions, 6(1): 15-31 (In Persian).
23. Schafleitner, R., A. Gaudin, R.O.G. Rosales, C.A.A. Aliagaand and M. Bonierbale. 2007. Proline accumulation and real time PCR expression analysis of genes encoding enzymes of proline metabolism in relation to drought tolerance in Andean potato. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29(1): 19-26.
24. Shi, S., M. Fan, K. Iwama, F. Li, Z. Zhang and L. Jia. 2015. Physiological basis of drought tolerance in potato grown under long-term water deficiency. *International Journal of Plant Production*, 9(2): 305-320.
25. Mardeh, A.S.S., A. Ahmadi, K. Poustini and V. Mohammadi. 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research*, 98(2-3): 222-229.
26. Ramezani, M., M.L. Rahimi, H.A. Ahije Samezade and F. Rahimi. 2008. The evaluation of grouping accuracy of different cluster analysis methods. *Agricultural Biotechnology*, 8(2): 207-218 (In Persian).
27. Safari, P., S.F. Danyali, M. Rahimi and A. Mahdavi Meyghan. 2019. Application of Gibbs Variable Selection Approach to Study Genetic Control of Water Deficient Stress Tolerance in Wheat. *Journal of Crop Breeding*, 11(30): 168-177 (In Persian).
28. Soleymanifard, A., K. Fasihi, H. Nasrirad and R. Naseri. 2010. Evolution of stress tolerance indices in durum wheat genotypes *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 17(2): 39-58 (In Persian).
29. Tourneux, C., A. Devaux, M. Camacho, P. Mamani and J.F. Ledent. 2003. Effects of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (I): Morphological Parameters, Growth and Yield, 23(2): 169-179.

Evaluation of Drought Tolerance of Potato (*Solanum Tuberosum* L.) under Water Deficit

**Zohreh Hajibarat¹, Abbas Saidi¹, Ahmad Mosuapour Gorji², Mohammad Reza Ghaffari³
and Mehrshad Zienalabedini³**

1- Department of Plant Sciences and Biotechnology, Faculty of Life Sciences and Biotechnology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Department of Vegetable Research, Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran,
(Corresponding author author: mousapour_gorji@yahoo.com)

3- Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran, Department of Systems and Synthetic Biology, Karaj, Iran
Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Iran

Received: May 12, 2020

Accepted: August 1, 2020

Abstract

Potato is considered as a strategic product in the food security of the country and is the fourth most consumed food product in Iran. Due to its shallow rooting system, this plant is sensitive to water deficit. In order to study the response of 20 potato genotypes to drought stress, a field experiment was conducted during 2018–2019 at the Seed and Plant Improvement Institute located at Karaj, Iran. The experimental design utilized was a Strip-plot based on randomized complete block design with three replications under two irrigation regimes (normal and stressed). ANOVA showed a significant difference for genotypes at 1% level for overall tuber yield, ware yield (tubers larger than 35 mm), seed yield (tubers between 35 and 55 mm), small yield (non-marketable potatoes), and marketable yield (total ware yield and seed yield). Eleven drought tolerance indices including STI, SSI, TOL, HARM, GMP, MP, YSI, DSI were calculated based on tuber yield under water deficit (Ys) and irrigated (Yp) conditions. Our results showed a highly significant and positive correlation between MP, Yp and Ys. The results of the analysis of PCA and the analysis of clustering showed that the drought-tolerance and drought-sensitive genotypes with the clustering pattern are consistent. The MP, GMP, STI and MSTI identified 902027 genotypes as the best genotype under normal and stress conditions. Among the genotypes and cultivars studied, 902027 and 8703- genotypes showed the highest MP and GMP, indicating high stability of genotypes in response to drought stress and thus can be considered as drought tolerant genotypes.

Keywords: Correlation analysis, Drought stress, Potato, Tolerance indices, Total yield