نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۳، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۵، ص. ۸۴-۷۰

Water Management in Agriculture
Vol. 13, No. 1, Spring and Summer 2026, 70-84

مقاله علمی -پژوهشی

گزینش ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی بر اساس شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش کم-آبی

کبری جانقربان[۱]، جمالعلی الفتی[۲]، محمدرضا خالدیان*[۳]، حسن حسن آبادی[۴]، یوسف حمیداوغلی[۵]

چکیده

پژوهش حاضر به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی، غربال شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش آبی و تعیین بهترین شاخص‌ها روی ۱۹ ژنوتیپ به‌منظور تولید غده بذری سیب‌زمینی انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی شامل دو سطح آبیاری کامل و کم آبیاری (۵۰ درصد مقدار آب داده شده در آبیاری کامل) و با سه تکرار با استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای در سال ۱۴۰۱ انجام شد. محل انجام آزمایش در گلخانه شرکت پرتیکان بذر گستر (تولیدکننده کلاس‌های مختلف بذر سیب‌زمینی) واقع در شهر میناشت در استان اصفهان بود. نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط آبیاری کامل ژنوتیپ *AD50* و در شرایط کم آبیاری ژنوتیپ AD15 به ترتیب با ۱۸ و ۲۰/۳ غده بیشترین غده تجاری را تولید کردند. بر اساس تعداد غده بذری تجاری تولیدی در دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری، شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش آبی شامل SSI، SI، HM، TOL، MP، YSI، GMP، STI، MRP، YI، REI و *SRI* محاسبه شدند. نتایج آزمون همبستگی نشان داد که شاخص *MRP* بیشترین همبستگی را با عملکرد در دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری داشت و مناسب‌ترین شاخص برای غربال کردن و یافتن ژنوتیپ‌های برتر بود. بر اساس نمودارهای سه‌بعدی و تجزیه خوشه‌ای سه ژنوتیپ AD15، AD50 و AD2 به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر برای دستیابی به عملکرد بالا در شرایط کم‌آبی معرفی شدند. در نهایت نشان داده شد که سه ژنوتیپ AD15، AD50 و AD2 علاوه بر تحمل شرایط کم آبیاری قادر هستند در شرایط آبیاری کامل عملکرد قابل قبول و بیشتر از والدین خود داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، غده سیب‌زمینی تجاری، کم آبیاری

مقدمه

سیب‌زمینی در برخی کشورها به‌عنوان ماده غذایی پایه مدنظر قرار گرفته و نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی، بهبود تغذیه انسانی و تضمین سلامتی آحاد جامعه دارد. تنش‌های غیر زیستی عامل اصلی تلفات محصول در سراسر جهان محسوب می‌شوند به‌گونه‌ای که بویر (۱۹۸۲) گزارش کرده است که ۵۰ درصد تلفات محصولات کشاورزی ناشی از تنش‌های غیر زیستی است. در میان تنش‌های مختلف، تنش آبی پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین تنش‌ها در جهان محسوب می‌شود (Pennisi, 2008). عواملی چون کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، بارش ناکافی یا خارج از فصل، تبخیر زیاد و خاک‌های با زه‌کشی ضعیف از عوامل ایجاد تنش خشکی محسوب می‌شوند (Salehi-Lisar and Bakhshayeshan-Agdam, 2016). تنش آبی می‌تواند باعث کاهش رشد گیاه از طریق کاهش سطح برگ، نرخ فتوسنتز، تعداد و وزن غده سیب‌زمینی شود (Schittenhelm et al., 2006; Schafleitner et al., 2007; Qin et al., 2019).

برنامه‌های اصلاحی می‌توانند یکی از راهکارهای سازگاری با پدیده تغییر اقلیم باشند که با بالا بردن تحمل گیاهان نسبت به تنش آبی، سطح عملکرد گیاه را افزایش داده یا حداقل حفظ می‌کنند (Mark and Peter, 2010). سیب‌زمینی به‌عنوان سومین منبع تأمین کالری برای انسان بعد از گندم و برنج، در بیش از ۱۵۰ کشور دنیا کشت می‌شود و سطح زیر کشتی بالغ بر ۱۹ میلیون هکتار دارد (FAO, 2024). این گیاه دارای سامانه ریشه کم‌عمق است و تنش آبی موجب کاهش عملکرد کمی و کیفی به‌ویژه کاهش تعداد غده

[۱] دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
[۲] استاد گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
[۳] دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و گروه پژوهشی مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوزه آبی دریای خزر، رشت، ایران (نویسندهٔ مسئول: khaledian@guilan.ac.ir)
[۴] دانشیار گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰
DOR: 10.22034/wmaj.2025.510972.1259

تولیدی می‌شود (Mackerron and Jefferies, 1998;Eiasu et al., 2007).

طبق گزارش‌های سازمان ملل در سال ۲۰۱۷ جمعیت جهان در سال ۲۰۱۵ حدود ۷/۴ میلیارد بود و این جمعیت تا سال ۲۰۳۰ به ۸/۶ و تا سال ۲۰۵۰ به ۱۱/۲ میلیارد افزایش خواهد یافت. این جمعیت رو به رشد منجر به تقاضای قابل‌توجهی برای غذا می‌شود. هم‌زمان با افزایش نیاز به غذا، نیاز به آب در بخش کشاورزی و غیر کشاورزی نیز افزایش خواهد داشت (O'Connell, 2017). چالش تغذیه افراد بیشتر با همان منابع آبی گذشته تنها با افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی تحت تنش، قابل‌حل است که تقویت ژنتیکی و به نژادی یکی از راهکارهای مهم در افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی در شرایط تنش خواهد بود. یکی از فاکتورهای افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی، افزایش بهره‌وری آب است. بهره‌وری آب از نسبت میزان ماده خشک تولیدشده یا عملکرد اقتصادی تولیدشده به میزان آب مصرفی یا مجموع آب آبیاری و بارندگی به‌دست می‌آید (Wang et al., 2019). میزان بهره‌وری آب تحت تأثیر محیط و ژنوتیپ قرار می‌گیرد (محمدپور و همکاران، ۱۴۰۳).

تحمل به کم آبی به‌عنوان ظرفیت نسبی گیاهان برای حفظ رشد و عملکرد گیاه تعریف می‌شود. در گیاهان حساس و غیر متحمل به خشکی، در شرایط کم آبی، فشار اسمزی و شیب غلظت مواد محلول منجر به کاهش پتانسیل آبی سلول شده و در صورت ادامه‌ی شرایط تنش، گیاه به دلیل از دست دادن آب سلول، از بین می‌رود. برخی از گیاهان می‌توانند با سنتز و یا تجمع املاح سازگار در سلول از کم آب (دهیدراته) شدن سلول طی تنش جلوگیری کرده و فشار اسمزی[1] را حفظ کنند. این املاح شامل آمینواسیدها، قندهای الکلی، الیگوساکاریدها و یون‌های غیر معدنی مانند پتاسیم است (Fang and Xiong, 2015).

پاسخ به تنش خشکی یک صفت پیچیده است که تحت کنترل ژنتیک و محیط است. در بسیاری از گونه‌های کشاورزی ظرفیت فرار، اجتناب و تحمل تنش خشکی گزارش شده است. این مکانیسم‌های دفاعی منحصر به فرد نیستند و گیاهان ممکن است مجموعه‌ای از انواع واکنش‌های دفاعی را داشته باشند (Ludlow et al., 1990). پاسخ به تنش به شدت تنش بستگی دارد اما عواملی چون مرحله نمو، سطح ذخایر متابولیکی، توانایی گیاه به پیش‌بینی ماهیت تنش و سایر عوامل محیطی موثر بر تنش خشکی (میزان نور، دما، زمان از سال و ...) نیز بستگی دارد. با این حال این مکانیسم‌های سازگاری با تنش معایبی نیز دارند. در مکانیسم فرار با کوتاه کردن دوره رشد، عملکرد را کاهش می‌دهد. در مکانیسم اجتناب، با بسته شدن روزنه و کاهش سطح برگ در نهایت توانایی فتوسنتزی گیاه کاسته و میزان جذب و بازده کربن کاهش می‌یابد. از سویی دیگر افزایش غلظت مواد محلول در مکانیسم تحمل با مصرف انرژی بیشتر برای تنظیم فشار اسمزی منجر به کاهش کانوپی گیاه به دلیل کاهش رشد و ریزش برگ‌های مسن‌تر می‌شود. تسریع پیری برگ و ریزش آن در اثر تنش خشکی یک راهکار برای کاهش پوشش گیاه است که در نهایت سبب کاهش بازدهی محصول می‌شود. بنابراین طی سازگاری گیاهان به شرایط تنش باید در عین حفظ تعادل بین فرار، اجتناب و تحمل، بهره‌وری کافی وجود داشته باشد. بنابراین پاسخ به تنش خشکی یک صفت پیچیده در اصلاح نژاد است و مجموعه‌ای از عوامل مورفولوژیکی، بیوشیمیایی، فیزولوژیکی و سلولی در آن دخیل است. بهبود تحمل به تنش خشکی نسبت به سایر تنش‌های غیر زیستی نیازمند یک رویکرد بین رشته‌ای گسترده‌تر شامل درک عوامل تعیین کننده عملکرد در محیط‌های هدف است.

بنابراین یکی از راهکارهای مقابله با کمبود آب انتخاب و معرفی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی است. برای اصلاح سیب زمینی در جهت تحمل شرایط کم آبیاری، کشت گلخانه‌ای با کاهش هزینه و زمان انتخاب ژنوتیپ‌های برتر، نسبت به کشت مزرعه اولویت دارد (Atlin et al., 2017; Placide et al., 2016).

توسعه کشت سیب زمینی در مناطق خشک و نیمه خشک با ویژگی کمبود آب یک چالش پژوهشی است. بنابراین گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی یکی از دغدغه‌های اصلی پژوهشگران در کشورهای مختلف با مشکل کمبود آب است که با پیامدهای تغییر اقلیم تشدید شده است. به‌دلیل فقر ژرم پلاسم سیب-زمینی موجود در ایران، تعداد محدودی ژنوتیپ متحمل به تنش آبی معرفی شده‌اند. گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی از میان ژنوتیپ‌های متنوع موجود کاری سنگین و زمان‌بر است. در مطالعه

[1] **فشار** اسمزی نیرویی است که باید بر مایع وارد شود تا مانع حرکت آن مایع از بین یک غشای نیمه تراوا شود.

حاضر دو رقم آگریا و دزیره که ارقام نسبتا مقاوم به کم آبی هستند تلاقی داده شدند و ۱۷ ژنوتیپ حاصل از تلاقی آنها با هدف انتخاب ژنوتیپ های برتر نسبت به تحمل کم آبی در دو شرایط آبیاری کشت شدند. بنابراین، ۱۹ ژنوتیپ شامل دو والد آگریا و دزیره به همراه ۱۷ ژنوتیپ حاصل از تلاقی آنها در دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری (۵۰ درصد آبیاری کامل) به‌منظور تولید غده بذری مدنظر قرار گرفتند و با استفاده از شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به تنش ارزیابی شدند. هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی و ارزیابی ۱۹ ژنوتیپ مختلف سیب‌زمینی برای اصلاح با تحمل بالا در برابر کم‌آبی است. با بهره‌گیری از روش‌های مختلف ارزیابی تحمل و حساسیت ژنوتیپ‌ها به تنش کم‌آبی، این پژوهش به دنبال یافتن بهترین نتاج حاصل از تلاقی آگریا و دزیره است که در شرایط کم آبیاری عملکرد مطلوبی داشته باشند تا در صورت دارا بودن عملکرد مطلوب به‌عنوان یک ژنوتیپ متحمل به تنش آبی معرفی شوند

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دو مکان و در دو مرحله مختلف انجام شد. مرحله اول از این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم باغبانی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی با ارتفاع ۷ متر از سطح دریای آزاد و در سال ۱۳۹۸ انجام شد. مرحله دوم این پژوهش در گلخانه شرکت پرتیکان بذر گستر (تولیدکننده کلاس‌های مختلف بذر سیب‌زمینی) واقع در شهر میناداشت در استان اصفهان در موقعیت جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی با ارتفاع ۱۶۱۷ متر از سطح دریا انجام شد.

مرحله اول: انجام تلاقی بین والدین برای تولید بذر حقیقی

این بخش از پژوهش در گلخانه پلی‌کربنات دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان در فصل زمستان (از دی ماه تا اسفند ماه) سال ۱۳۹۸ انجام شد. برای انجام این بخش از پژوهش دو رقم آگریا به‌عنوان والد مادری و دزیره به‌عنوان والد پدری که از ارقام نیمه-متحمل به خشکی محسوب می‌شوند استفاده شد. ویژگی‌های این دو رقم در جدول ۱ ارائه شده است.

همانگونه که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود رقم آگریا از ارقام نسبتا عقیم محسوب می‌شود و برای والد مادری مناسب است در حالی‌که رقم دزیره با تولید گرده بالا برای والد پدری رقم مناسبی محسوب می‌شود. سیب‌زمینی در شرایط معمولی گلخانه به گل نمی‌رود و برای تولید گل با کیفیت، نیاز به شرایط محیطی مناسب است. برای انجام این پژوهش با کمک سیستم سرمایشی-گرمایشی اسپلیت، دمای گلخانه تقریبا در محدوده دمایی ۱۹-۲۲ درجه سلسیوس حفظ و برای تأمین نور مورد نیاز از لامپ بخار سدیمی ۲۵۰ وات استفاده شد. مساحت گلخانه تحقیقاتی مورداستفاده ۴۰۰ مترمربع بود.

یکی از دلایل عدم گلدهی مناسب سیب زمینی، هم‌زمانی گلدهی و غده‌دهی است. بنابراین اولین اقدام برای گلدهی، ممانعت از تولید استولون و تشکیل غده بود. پیش از انجام بخش اصلی پژوهش، برای ممانعت از تشکیل غده از روش کشت در گلدان‌های کوچک استفاده شد. غده‌های ارقام آگریا و دزیره در گلدان‌های با دهانه ۱۵ سانتی-متری کشت شدند. بستر مورداستفاده کوکوپیت-پرلیت با نسبت ۱:۱ بود. کود مورداستفاده کود ۲۰:۲۰:۲۰ غنی شده با عناصر میکرو بود. به‌منظور جلوگیری از بروز کمبود کلسیم موثر در تشکیل گل و میوه، محلول‌پاشی با سولفات کلسیم هر دو روز در میان انجام شد. طول روز (۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی) و شدت و کیفیت نور مورد نیاز با استفاده از لامپ بخار سدیم ۲۵۰ وات در گلخانه تأمین شد. برای سهولت گرده‌افشانی، از نخ‌های گلخانه برای هدایت عمودی بوته‌ها استفاده شد. پس از گذشت دو ماه گلدهی در هر دو رقم آغاز گردید. برای جمع‌آوری گرده رقم دزیره، بساک‌های گل‌های باز شده در ابتدای صبح در یک پتری‌دیش جمع و در دمای اتاق خشک گردیدند. گرده‌ها به راحتی از بساک‌های خشک شده خارج می‌شوند.

عقیم‌سازی در گل‌های آگریا به دلیل عقیم بودن این رقم انجام نشد و گل‌های باز شده به راحتی تلاقی داده شدند. اما پس از انجام تلاقی برای تشخیص گل‌های تلاقی داده شده و گل‌های جدید روز بعد، گلبرگ‌های گل‌های تلاقی داده شده حذف گردید. بعد از گذشت یک هفته میوه‌های تشکیل شده قابل رویت و حدود ۳۵ تا ۴۰ روز بعد از تلاقی، میوه‌های تشکیل شده قابل برداشت بود. بعد از برداشت، بذرگیری انجام شد. بذرهای تولیدشده در دمای اتاق خشک و برای رفع خواب بذر، در دمای ۴ درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شدند.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های مهم ارقام دزیره و آگریا

صفات	دزیره	آگریا
بلوغ	نیمه دیررس تا دیرس	نیمه دیررس تا دیرس
رنگ پوست	قرمز	زرد
رنگ گوشت	زرد تا کرم	زرد پر رنگ
توانایی تولید میوه	بالا	ندارد
توانایی تولید گرده زایا	بالا	عقیم
عمق چشم	سطحی تا متوسط	سطحی
عملکرد	متوسط تا خیلی بالا	متوسط
دوره رکود غده	متوسط تا طولانی	طولانی
سیاه شدگی بعد از پخت	کم تا بدون سیاه شدگی	کم تا بدون سیاه شدگی
میزان آنزیم قهوه‌ای کننده	کم	کم
مناسب بودن برای چیپس	متوسط	قابل قبول
میزان ماده خشک	متوسط تا زیاد	کم تا زیاد
میزان نشاسته	کم تا زیاد	کم تا متوسط
تحمل خشکی	خیلی بالا	متوسط

مرحله دوم: انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل خشکی در شرایط گلخانه

جهت کاهش تعداد نتاج قابل بررسی در گلخانه، ابتدا ۱۰۰ بذر حاصل از تلاقی در شرایط درون‌شیشه‌ای کشت و با کمک سوربیتول ۶ درصد ژنوتیپ‌های زنده مانده به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل برای کشت در گلخانه انتخاب شدند. در نهایت ۱۷ ژنوتیپ حاصل از تلاقی آگریا-دزیره در سطح ۶ درصد سوربیتول زنده ماندند که گیاهچه‌های کشت بافتی آن‌ها و گیاهچه والدین برای کشت در گلخانه انتخاب شدند. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی شامل دو سطح آبیاری کامل و کم آبیاری (۵۰ درصد مقدار آب داده شده در آبیاری کامل)، ۱۹ ژنوتیپ و سه تکرار (۵۷ واحد آزمایشی) اجرا شد. نیاز آبی روزانه سیب‌زمینی براساس داده‌های لایسیمتری چمن و میانگین ضریب گیاهی ارقام آگریا و دزیره محاسبه شد. کل آزمایش به دو قسمت آبیاری کامل و کم آبیاری تقسیم شد.

آماده‌سازی پیش از کشت

این بخش از آزمایش در یک گلخانه پلاستیکی دو لایه با دمای ۳±۲۵ درجه سلسیوس (دارای سامانه‌های تنظیم دمای بخاری و پنجره سقفی) در پاییز و زمستان ۱۴۰۱ انجام شد. برای ممانعت از تأثیر جریان باد روی نتیجه آزمایش بخش کناری گلخانه با فاصله مناسب از بخاری و پنجره سقفی انتخاب شد. برای آماده‌سازی بستر کشت از دو کارتن پلاست با عرض نیم متر، عمق ۳۰ سانتی‌متر و طول ۲۰ متر که یکی برای شرایط نرمال و دیگری برای شرایط تنش استفاده شد. برای جداسازی فضای مورد نیاز برای رشد و غده‌دهی هر ژنوتیپ، طول کارتن پلاست به کمک یک تکه کارتن پلاست به عرض نیم متر و عمق ۳۰ سانتی‌متر به ۶۰ قسمت ۲۰ سانتی‌متری تقسیم شد. از سامانه آبیاری قطره‌ای با دو قطره‌چکان در هر فضای کشت استفاده شد. برای برآورد میزان آبیاری ابتدا میزان آب خروجی از هر قطره‌چکان در دقیقه ۲۲ میلی‌لیتر اندازه‌گیری شد. بنابراین میزان آبیاری هر بخش ۴۴ میلی‌لیتر در دقیقه بود. بستر مورداستفاده کوکوپیت-پرلیت با نسبت ۱۰:۱ و محلول غذایی مورداستفاده در این بخش، محلول غذایی ویژه سیب‌زمینی در کشت هیدروپونیک بود. پیش از کشت نشای ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی، سه میکرولایسیمتر حاوی چمن برای تعیین میزان آبیاری تهیه شد.

مراحل کاشت و آبیاری: قبل از شروع کشت گیاهچه‌های سیب-زمینی، بسترهای کشت آبیاری کامل شدند و سپس گیاهچه‌هایی با طول ۴ سانتی‌متر انتخاب و پس از شستشو با آب کشت شدند. برای کاهش خطای آزمایش، از کشت گیاه در ابتدا و انتهای نوار آبیاری

خودداری شد و همچنین در فضای قبل از اولین ژنوتیپ کشت شده و بعد از آخرین ژنوتیپ کشت شده نیز گیاه کشت شد تا خالی بودن فضای کناری منجر به افزایش خطای آزمایش نشود. برای سازگاری گیاهچه‌های کشت بافتی به شرایط گلخانه یک پلاستیک سراسری روی کارتن پلاست‌ها کشیده شد و بعد از گذشت یک هفته به تدریج پلاستیک‌ها از روی گیاهچه‌ها برداشته شد. در یک هفته اول بعد از کشت آبیاری انجام نشد و بعد از گذشت یک هفته بر اساس میزان تبخیر-تعرق چمن و ضریب گیاهی سیب‌زمینی (Allen et al., 1998) آبیاری آغاز شد. به دلیل حساس بودن گیاهچه‌های کشت بافتی اعمال تنش تا ۳۰ روز بعد از آغاز آبیاری، به تعویق افتاد. برای برآورد میزان آبیاری گیاهان، از میانگین ضریب گیاهی به‌دست آمده برای ارقام دزیره و آگریا برای چهار دوره رشدی (۰/۴۹، ۰/۸، ۱/۱۴، ۰/۸۷) استفاده شد (جانقربان، ۱۴۰۴).

نحوه اعمال تنش: برای اعمال تنش روزانه هر سه میکرولایسیمتر چمن وزن شدند و میانگین کاهش وزن هر سه به‌عنوان تبخیر-تعرق گیاه مرجع مورداستفاده قرار گرفت. سپس بر اساس فرمول زیر میزان مدت زمان آبیاری با سامانه آبیاری قطره‌ای بر حسب ثانیه به دست آمد.

$$\text{مدت زمان آبیاری (ثانیه)} = \frac{X \times \frac{1}{2}(Kcd + Kca) \times 60(\text{ثانیه})}{2 \times 22(\text{گرم})} \quad (۱)$$

که در آن X؛ میانگین کاهش وزن میکرولایسیمتر حاوی گیاه مرجع، Kcd: ضریب گیاهی دزیره و Kca= ضریب گیاهی آگریا می‌باشد.در این معادله، عدد ۲۲ میزان وزن آب خروجی از هر قطره‌چکان بر حسب گرم است. برای اعمال تنش مدت زمان آبیاری به نصف کاهش پیدا کرد.

بعد از گذشت ۹۷ روز از کشت گیاهچه‌های کشت بافتی، برداشت و داده‌برداری انجام شد. در مطالعه حاضر تعداد غده تجاری به‌عنوان عملکرد اقتصادی مدنظر قرار گرفت (Balkaya et al, 2011) و در شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به تنش آبی به‌عنوان عملکرد استفاده شد. از آنجایی‌که مینی‌تیوبر تولیدشده در گلخانه با قطر ۲۰ میلی‌متر به بالا به‌عنوان اندازه تجاری در نظر گرفته می‌شود، برای تعیین تعداد غده تجاری با کمک یک توری با اندازه منافذ ۲۰ میلی-متر غده‌های هر بوته الک شده و به‌عنوان تعداد غده تجاری (قابل فروش) ثبت شد.

مطالعه حاضر به‌منظور بررسی پاسخ ۱۹ ژنوتیپ سیب‌زمینی مورد مطالعه به تنش آبی و تعیین شاخص‌های تحمل و حساسیت آن‌ها بر مبنای تعداد غده تولیدی اجرا شد. برای ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌ها از لحاظ تعداد غده تجاری تولیدی و تعیین ارقام متحمل به تنش، از تعدادی شاخص تحمل و حساسیت استفاده شد. این شاخص‌ها شامل SSI و SI (Fischer and Maurer, 1978)، HM (Rosielle and Hamblin, 1981)، TOL (Rosielle and Hamblin, 1981)، MP (Bouslama and Schaugh, 1984)، YSI (Fernandez, 1992)، GMP (Fernandez, 1992)، STI (Hossain et al., 1999)، MRP (Gavuzzi et al., 1997)، REI (Hossain et al., 1999) و SRI (Lan, 1998) به‌ترتیب بر اساس روابط ۳ تا ۱۳ محاسبه شدند.

(۳) شاخص حساسیت به تنش

$$SSI = \frac{(1-\frac{Y_S}{Y_p})}{SI}$$

$$SI = 1-\frac{\bar{Y}_S}{\bar{Y}_p}$$

(۴) شاخص میانگین هارمونیک یا همساز

$$HM = \frac{2Y_pY_s}{(Y_p+Y_s)}$$

(۵) شاخص تحمل

$$TOL = Y_{p_}Y_S$$

(۶) شاخص بهره‌وری

$$MP = \left(\frac{Y_p+Y_s}{2}\right)$$

(۷) شاخص ثبات عملکرد

$$YSI = \frac{Y_S}{Y_P}$$

(۸) شاخص میانگین هندسی بهره‌وری

$$GMP = \sqrt{Y_p.Y_s}$$

(۹) شاخص تحمل به تنش

$$STI = \frac{Y_p-Y_s}{(\bar{Y}_p)}$$

(۱۰) شاخص میانگین بهره‌وری نسبی

$$MRP = \frac{Y_S}{\bar{Y}s} + \frac{Y_p}{\bar{Y}_P}$$

(۱۱) شاخص عملکرد

$$YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_S}$$

(۱۲) شاخص بهره‌وری نسبی

$$REI = \frac{Y_S}{\bar{Y}s} \times \frac{Y_p}{\bar{Y}_P}$$

(۱۳) شاخص تحمل تنش

$$SRI = \frac{Ys \times \left(\frac{Ys}{Yp}\right)}{\overline{Ys}}$$

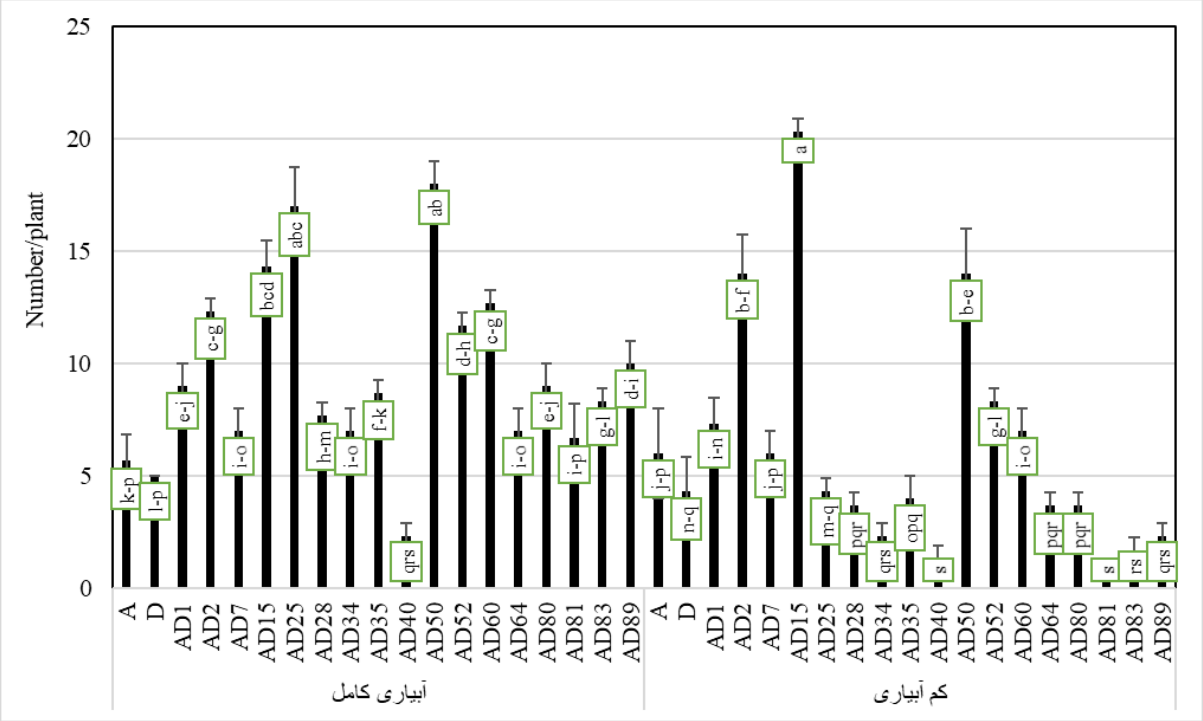
که در آن‌ها Y_p = عملکرد ژنوتیپ مورد نظر در محیط بدون تنش؛ Y_s = عملکرد ژنوتیپ مورد نظر در محیط دارای تنش؛ $\overline{Y}_p$ = میانگین عملکرد همه ژنوتیپ‌ها در محیط بدون تنش؛ $\overline{Y}_s$ = میانگین عملکرد همه ژنوتیپ‌ها در محیط دارای تنش است.

بررسی نرمال بودن داده‌ها با آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک توسط نرم‌افزار SPSS انجام شد. به‌منظور تعیین مناسب‌ترین شاخص برای تشخیص ژنوتیپ‌های متحمل به تنش، همبستگی بین عملکرد (در شرایط تنش و بدون تنش) و شاخص‌های مختلف محاسبه شد. شاخص‌هایی که در هر دو محیط دارای همبستگی نسبتاً بالایی با عملکرد بودند به‌عنوان بهترین شاخص‌ها شناسایی شدند. تفکیک دقیق‌تر ژنوتیپ‌ها بر اساس نمودار سه بعدی X، Y و Z صورت گرفت که بدین‌منظور از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. برای انجام تجزیه واریانس، مقایسه میانگین‌ها با آزمون توکی و تجزیه خوشه‌ای به روش حداقل واریانس Ward از نرم‌افزار SPSS 21 استفاده شد. نمودارها به‌وسیله نرم افزار Excel رسم گردید.

نتایج و بحث

آنالیز واریانس تعداد غده تجاری در دو تیمار آبیاری کامل و کم آبیاری با ۱۹ ژنوتیپ مختلف سیب‌زمینی در جدول ۲ ارائه شده است. اثر ساده آبیاری و ژنوتیپ بر تعداد غده تجاری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. به‌عبارت دیگر متوسط تعداد غده تجاری ۱۹ ژنوتیپ سیب‌زمینی مورد مطالعه در دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری از نظر آماری متفاوت بود. واکنش گیاه سیب‌زمینی به کم آبیاری با توجه به سامانه ریشه‌ای کم‌عمق و حساس بودن به کم آبیاری قابل پیش‌بینی بود (Stalham et al., 2007). مقایسه میانگین (جدول ۲) ژنوتیپ‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها و وجود تنوع ژنتیکی ذاتی ژنوتیپ‌های مختلف سیب‌زمینی را نشان می‌دهد. درک تفاوت بین ژنوتیپ‌های مختلف یک گیاه زمینه انتخاب ژنوتیپ یا ژنوتیپ‌های برتر براساس معیارهای مدنظر پژوهشگران را فراهم می‌آورد (Ndukaula et al., 2015). همچنین اثر متقابل آبیاری و ژنوتیپ بر تعداد غده تجاری در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱) که حاکی از واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها از نظر این صفت به کم آبیاری است.

میانگین تعداد غده تجاری در تیمار آبیاری کامل و کم آبیاری به ترتیب ۹/۴ و ۶/۱ بود. کاهش ۳۵ درصدی تعداد غده تجاری تولیدی در تیمار کم آبیاری نشان دهنده اثر قابل توجه اعمال تنش خشکی بر این صفت مهم است. پژوهش‌های پیشین نیز نتایج مشابهی در خصوص اثر کم آبیاری بر عملکرد سیب‌زمینی گزارش کرده‌اند (Schittenhelm et al., 2006; Schafleitner et al., 2007; Qin et al., 2019). همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود رقم اگریا برخلاف رقم دزیره واکنش مثبتی از نظر تعداد غده تجاری به کم آبیاری داشته است و دارای متوسط ۶ غده در شرایط کم آبیاری نسبت به آبیاری کامل با متوسط ۵/۷ غده داشته است ($p>0.05$). اگر حتی این دو عدد نزدیک به هم تصور شوند، حداقل می‌توان گفت که کم آبیاری باعث کاهش تعداد غده تجاری نشده است. این ویژگی مثبت والد در برخی ژنوتیپ‌ها دیده می‌شود، ژنوتیپ‌های AD2 و AD15 چنین وضعیتی داشتند، ولی به‌طور کلی کم آبیاری موجب کاهش تعداد غده تجاری سایر ژنوتیپ‌ها شده است (شکل ۱). میانگین تعداد غده تجاری ۱۹ ژنوتیپ سیب‌زمینی در دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری در شکل ۲ ارائه شده است. ژنوتیپ AD15 و AD50 به ترتیب با ۱۷/۳ و ۱۶ بیشترین تعداد غده تجاری را در بین ۱۹ ژنوتیپ مورد مطالعه تولید کردند. میزان تولید غده تجاری در ژنوتیپ‌های مختلف بین یک تا ۲۰/۳ به ترتیب در ژنوتیپ-های AD81 و AD15 بود.

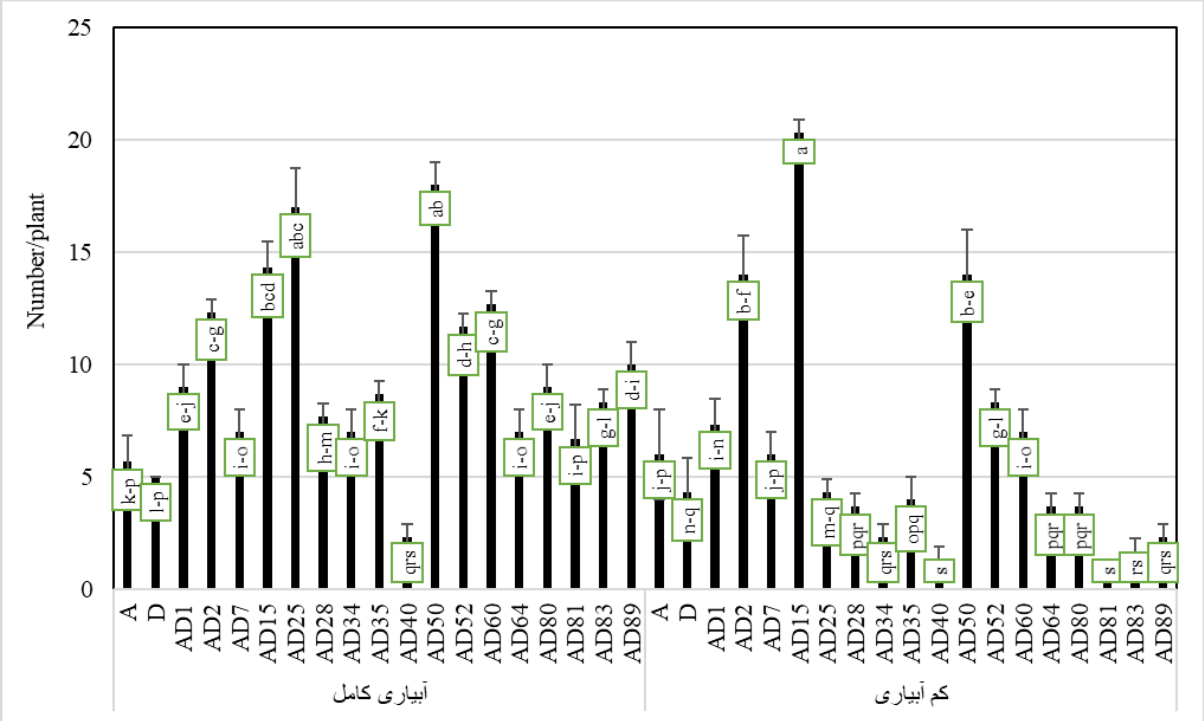


شکل ۱- مقایسه تعداد غده تجاری در بوته در ژنوتیپ‌های مختلف به تفکیک تیمار آبیاری

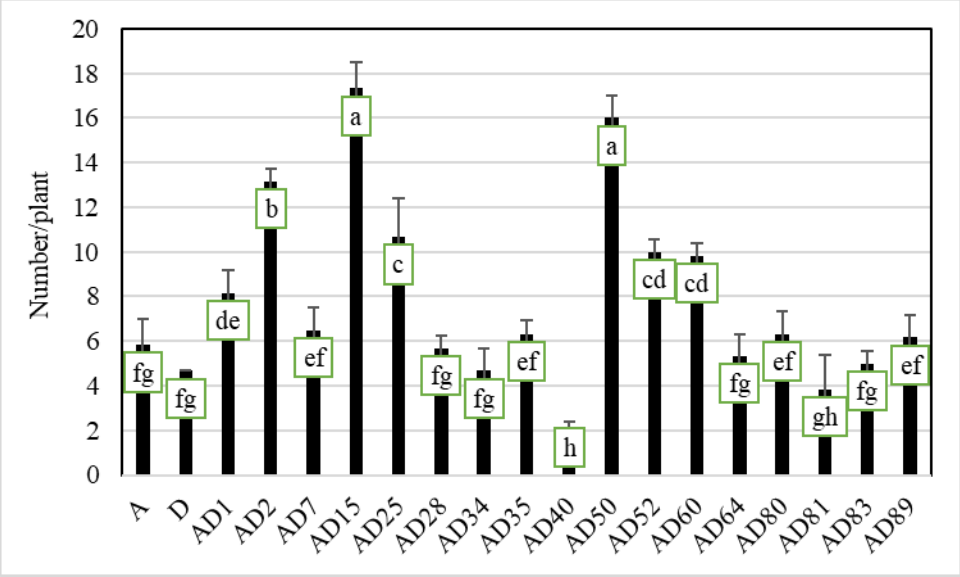
در شرایط آبیاری کامل بیشترین تعداد غده تجاری مربوط به ژنوتیپ *AD50* با ۱۸ غده بود. در حالی‌که در شرایط کم آبیاری ژنوتیپ *AD15* با ۲۰/۳ غده بیشترین تعداد غده تجاری تولیدی را به خود اختصاص داد (شکل ۲). کمترین تعداد غده تجاری تولیدی در شرایط آبیاری کامل مربوط به ژنوتیپ *AD40* با ۲/۳ غده و در شرایط کم آبیاری مربوط به ژنوتیپ *AD81* با یک غده بود (شکل ۳). کاهش کم تعداد غده تجاری مربوط به یک ژنوتیپ به معنی تحمل آن نسبت به شرایط محیطی اعمال شده است، اما اگر توان تولیدی ذاتی یک ژنوتیپ کم باشد، تحمل شرایط تنش به تنهایی در پروژه اصلاحی کارایی نخواهد داشت. در حقیقت اصلاح‌گر به دنبال ژنوتیپ‌هایی است که علاوه بر تحمل شرایط تنش، در هر دو شرایط تنش و بدون تنش (نرمال) عملکرد مطلوبی داشته باشد (محمدپور و همکاران، ۱۴۰۳).

جدول ۲ میانگین شاخص‌های تحمل و حساسیت تعداد غده تجاری ۱۹ ژنوتیپ سیب‌زمینی در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری را نشان می‌دهد. اختلاف بین ژنوتیپ‌ها از نظر شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش آبی و تعداد غده تجاری تولیدی ژنوتیپ‌ها در دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری بیانگر تنوع ژنتیکی و امکان انتخاب ژنوتیپ‌های برتر برای تحمل کم‌آبی و تولید تعداد غده تجاری مناسب است. از نظر شاخص‌های تحمل به تنش آبی شامل HM، MP، GMP، STI، MRP، YI، REI و SRI، بیشترین مقدار عددی شاخص‌ها در ژنوتیپ‌های AD15 و AD50 ثبت شد. ارتباط بین عملکرد و شاخص‌های تحمل در مطالعه حاضر با یافته‌های فرناندز (Fernandez, 1992) و مهدوی و همکاران (۱۳۹۱) همسو است. با توجه به مقدار شاخص‌های حساسیت به تنش SSI، ژنوتیپ‌های AD81 و AD89 و با شاخص TOL ژنوتیپ‌های AD25 و AD89 حساس بودند. انتخاب بر اساس شاخص TOL به نفع ژنوتیپ‌های با عملکرد پایین در شرایط غیر تنش است. بنابراین شاخص فوق در تمایز ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا کارآیی چندانی ندارد (Fernandez, 1992). انتخاب بر اساس شاخص SSI زمانی موثر است که محیط آزمایش دارای شرایط

تنش آبی باشد که در این آزمایش برقرار بود. مقدار کمتر شاخص SSI تغییرات کمتر عملکرد یک ژنوتیپ در شرایط تنش و پایداری بیشتر آن را نشان می‌دهد (Acosta-Gollegos and Adams, 1991).



شکل ۲- مقایسه تعداد غده تجاری در بوته در ژنوتیپ‌های مختلف به تفکیک تیمار آبیاری



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر ژنوتیپ بر میانگین تعداد غده تجاری در بوته

یکی از معایب شاخص SSI آن است که این شاخص نسبت عملکرد در شرایط دارای تنش و بدون تنش را برای هر ژنوتیپ در مقایسه با همین نسبت برای کل ژنوتیپ‌های موجود در مطالعه محاسبه می‌کند. بنابراین، دو ژنوتیپ با عملکرد زیاد و کم می‌توانند مقدار SSI یکسانی داشته باشند (درگاهی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین انتخاب بر مبنای شاخص SSI باعث انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی و موجب کاهش پتانسیل عملکرد در شرایط بدون تنش خواهد شد (Clark et al., 1992).

جدول ۲- میانگین شاخص‌های تحمل و حساسیت عملکرد ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی در دو تیمار آبیاری کامل و کم آبیاری

ژنوتیپ	Yp	Ys	SSI	HM	TOL	MP	YSI	GMP	STI	MRP	YI	REI	SRI	SI
آگریا	۵/۷	۶	-۰/۲	۵/۷	-۰/۳	۵/۸	۱/۱	۵/۸	۰/۴	۱/۶	۱	۰/۶	۱/۲	۰/۴
دزیره	۵	۴/۳	۰/۴	۴/۵	۰/۷	۴/۷	۰/۹	۴/۶	۰/۲	۱/۲	۰/۷	۰/۴	۰/۷	۰/۴
AD1	۹	۷/۳	۰/۵	۸	۱/۷	۸/۲	۰/۸	۸/۱	۰/۷	۲/۲	۱/۲	۱/۱	۱	۰/۴
AD2	۱۲/۳	۱۴	-۰/۴	۱۳	-۱/۷	۱۳/۲	۱/۱	۱۳/۱	۱/۹	۳/۶	۲/۳	۳	۲/۷	۰/۴
AD7	۷	۶	۰/۴	۶/۴	۱	۶/۵	۰/۹	۶/۵	۰/۵	۱/۷	۱	۰/۷	۰/۹	۰/۴
AD15	۱۴/۳	۲۰/۳	-۱/۲	۱۶/۸	-۶	۱۷/۳	۱/۴	۱۷/۱	۳/۳	۴/۹	۳/۳	۵/۱	۴/۸	۰/۴
AD25	۱۷	۴/۳	۲/۱	۶/۹	۱۲/۷	۱۲/۷	۰/۳	۸/۵	۰/۸	۲/۵	۰/۷	۱/۳	۰/۲	۰/۴
AD28	۷/۷	۳/۷	۱/۵	۴/۹	۴	۵/۷	۰/۵	۵/۳	۰/۳	۱/۴	۰/۶	۰/۵	۰/۳	۰/۴
AD34	۷	۲/۳	۱/۸	۳/۴	۴/۷	۴/۷	۰/۳	۴	۰/۲	۱/۱	۰/۴	۰/۳	۰/۱	۰/۴
AD35	۸/۷	۴	۱/۵	۵/۴	۴/۷	۶/۳	۰/۵	۵/۹	۰/۴	۱/۶	۰/۷	۰/۶	۰/۳	۰/۴
AD40	۲/۳	۱/۳	۱/۱	۱/۶	۱	۱/۸	۰/۶	۱/۷	۰/۰	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۴
AD50	۱۸	۱۴	۰/۶	۱۵/۷	۴	۱۶	۰/۸	۱۵/۸	۲/۸	۴/۲	۲/۳	۴/۴	۱/۸	۰/۴
AD52	۱۱/۷	۸/۳	۰/۸	۹/۷	۳/۳	۱۰	۰/۷	۹/۹	۱/۱	۲/۶	۱/۴	۱/۷	۱	۰/۴
AD60	۱۲/۷	۷	۱/۲	۹	۵/۷	۹/۸	۰/۶	۹/۴	۱	۲/۵	۱/۲	۱/۵	۰/۷	۰/۴
AD64	۷	۳/۷	۱/۳	۴/۸	۳/۳	۵/۳	۰/۵	۵	۰/۳	۱/۳	۰/۶	۰/۴	۰/۳	۰/۴
AD80	۹	۳/۷	۱/۶	۵/۲	۵/۳	۶/۳	۰/۴	۵/۷	۰/۴	۱/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۳	۰/۴
AD81	۶/۷	۱	۲/۴	۱/۷	۵/۷	۳/۸	۰/۲	۲/۶	۰/۱	۰/۹	۰/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۴
AD83	۹	۲/۳	۲/۱	۳/۷	۶/۷	۵/۷	۰/۳	۴/۶	۰/۲	۱/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۱	۰/۴
AD89	۱۰	۲/۳	۲/۱	۳/۸	۷/۷	۶/۲	۰/۲	۴/۸	۰/۳	۱/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۱	۰/۴

جدول ۳ ژنوتیپ‌هایی که رتبه یک تا پنج را در شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به تنش آبی در دو تیمار آبیاری کامل و کم آبیاری کسب کرده‌اند، نشان می‌دهد. ژنوتیپ‌های AD15، AD50و AD2 به‌ترتیب حائز بیشترین رتبه‌های یک تا پنج از نظر شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به تنش شدند.

با توجه به اینکه شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی با لحاظ کردن مجزای شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به تنش آبی و یا تعداد غده تجاری تولیدی در دو محیط شرایط مطلوب و تنش دشوار و منتج به یافته‌های متضاد می‌شود، بنابراین با استفاده از ضریب همبستگی بین شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش آبی و عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری، مناسب‌ترین شاخص تعیین شده و بر اساس آن، بهترین ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی معرفی شدند. جدول ۵ ضریب همبستگی شاخص‌های تحمل و حساسیت ۱۹ ژنوتیپ سیب‌زمینی در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری را نشان می‌دهد. شاخص MRP بالاترین ضریب همبستگی مثبت و معنی‌دار را با عملکرد در دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری را به خود اختصاص داد. زهراوی و همکاران (۱۳۸۸) و مهدوی و همکاران (۱۳۹۱) از چنین راهکاری

برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی در مطالعه خود استفاده کردند. شاخص MRP با شاخص‌های MP، GMP، STI، HM، YSI، SRI، YI و REI همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. با توجه به اینکه این شاخص‌ها بالاترین مقدار همبستگی را با عملکرد در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری داشتند، بنابراین شاخص MRP به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص تحمل به تنش کم‌آبی در نظر گرفته شد و ژنوتیپ‌هایی که بالاترین میزان این شاخص را داشته باشند، به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کم‌آبی معرفی شد.

جدول ۳- ژنوتیپ‌های با رتبه یک تا پنج از نظر شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش آبی در دو تیمار آبیاری کامل و کم آبیاری

ژنوتیپ	Yp	Ys	SSI	HM	TOL	MP	YSI	GMP	STI	MRP	YI	REI	SRI
AD15	۳	۱		۱		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
AD50	۱	۳		۲		۲		۲	۲	۲	۳	۲	۳
AD2	۵	۲		۳		۳	۲	۳	۳	۳	۲	۳	۲
AD52		۴		۴		۵		۴	۴	۴	۴	۴	
AD60	۴			۵	۴	۴		۵	۵			۵	
AD25	۲		۴		۱					۵			
آگریا							۳						
AD1		۵									۵		۴
AD81			۱		۵								۵
AD83			۳		۳								
AD89			۲		۲								
دزیره							۴						
AD7							۵						
AD34			۵										

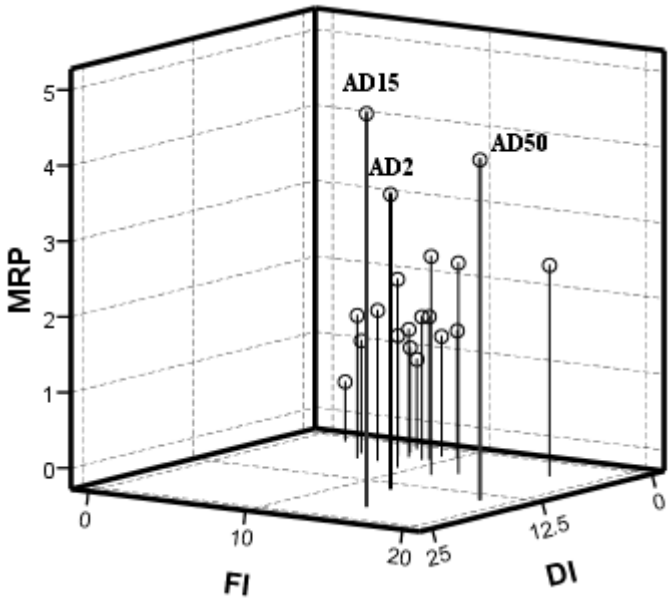
به‌منظور تعیین ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی، از نمودار سه‌بعدی با سه عامل تعداد غده تجاری تولیدی در آبیاری کامل، تعداد غده تجاری تولیدی در کم آبیاری و مقدار شاخص تحمل MRP که دارای بیشترین همبستگی با عملکرد در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری بود، استفاده شد. شکل ۴ رابطه شاخص تحمل تنش آبی و عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف سیب‌زمینی در دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ ژنوتیپ‌های AD15، AD50 و AD2 دارای بیشترین میزان شاخص تحمل و عملکرد در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری هستند. ژنوتیپ‌ها معمولاً به چهار گروه اصلی، ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری (گروه A)، ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا تنها در شرایط آبیاری کامل (گروه B)، ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا تنها در شرایط کم آبیاری (گروه C) و ژنوتیپ‌های با عملکرد پایین در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری (گروه D) تقسیم‌بندی می‌شوند (Fernandez, 1992; Wang et al., 2018; Wang, 2021). این نحوه توزیع ژنوتیپ‌ها بیانگر تنوع ژنتیکی موجود در آنها نسبت به شرایط تنش آبی است (درگاهی و همکاران، ۱۳۹۰)..

شکل ۵ دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای به روش WARD بر اساس داده‌های مربوط به شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش آبی و تعداد غده تجاری تولیدی در دو شرایط تنش و بدون تنش را نشان می‌دهد. بر اساس شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش آبی، ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در دو گروه جداگانه متحمل و حساس به تنش آبی قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های AD15، AD50 و AD2 در گروه متحمل به تنش آبی قرار گرفتند. سایر ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از جمله ارقام آگریا و دزیره در گروه حساس به تنش آبی قرار گرفتند. نتایج حاصل از تجزیه خوشه‌ای با سایر روش‌های استفاده شده در پژوهش حاضر همسو بودند. با توجه به حداکثر فاصله ژنتیکی بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر عملکرد و نیز تحمل تنش کم‌آبی می‌توان برای تجزیه ژنتیکی شاخص‌های کمی تحمل تنش آبی و

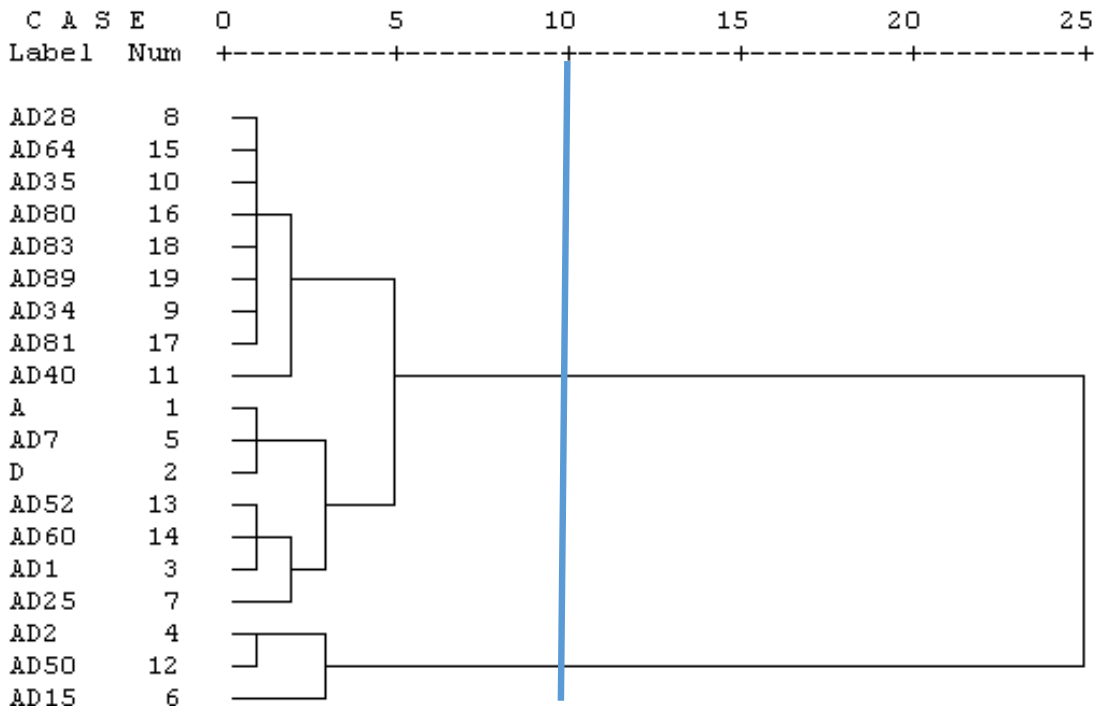
عملکرد در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری از دورگ‌گیری بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی استفاده کرد (مهدوی و همکاران، ۱۳۹۱).

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های تحمل و حساسیت عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف سیب‌زمینی در دو تیمار آبیاری کامل و کم آبیاری

	Yp	Ys	SSI	HM	TOL	MP	YSI	GMP	STI	MRP	YI	REI
Ys	۰/۵۹**											
SSI	-۰/۲۷^{ns}	-۰/۷۷**										
HM	۰/۷۴**	۰/۹۶**	-۰/۶۲**									
TOL	۰/۲۶^{ns}	-۰/۵۲*	۰/۹۲**	-۰/۳۴^{ns}								
MP	۰/۸۸**	۰/۸۶**	-۰/۴۲^{ns}	۰/۹۵**	-۰/۱۳^{ns}							
YSI	۰/۰۵^{ns}	۰/۸**	-۰/۹۹**	۰/۶۵**	-۰/۹**	۰/۴۵^{ns}						
GMP	۰/۷۹**	۰/۹۳**	-۰/۵۵*	۰/۹۹**	۰/۲۷^{ns}	۰/۹۷**	۰/۵۸**					
STI	۰/۸۱**	۰/۹۲**	-۰/۵۳*	۰/۹۹**	-۰/۲۵^{ns}	۰/۹۸**	۰/۵۶**	۰/۹۹**				
MRP	۰/۸۳**	۰/۹۱**	-۰/۵۱*	۰/۹۸**	-۰/۲۲^{ns}	۰/۹۹**	۰/۵۴**	۰/۹۹**	۰/۹۹**			
YI	۰/۶۰**	۰/۹۹**	-۰/۷۶**	۰/۹۷**	-۰/۵۱*	۰/۸۷**	۰/۷۸**	۰/۹۴**	۰/۹۳**	۰/۹۲**		
REI	۰/۷۹**	۰/۹۴**	-۰/۵۶*	۰/۹۹**	-۰/۲۸^{ns}	۰/۹۷**	۰/۶۰**	۰/۹۹**	۰/۹۹**	۰/۹۹**	۰/۹۴**	
SRI	۰/۳۵^{ns}	۰/۹۴**	-۰/۹۱**	۰/۸۶**	-۰/۷۴**	۰/۷۰**	۰/۹۳**	۰/۸۱**	۰/۷۹**	۰/۷۸**	۰/۹۳**	۰/۸۲**



شکل ۴- رابطه شاخص تحمل تنش آبی MRP و تعداد غده تجاری تولیدشده ژنوتیپ‌های مختلف سیب‌زمینی در دو شرایط آبیاری کامل (FI) و کم آبیاری (DI)



شکل ۵- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای به روش WARD بر اساس داده‌های مربوط به شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش آبی و عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف سیب‌زمینی در دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تحمل و حساسیت به تنش آبی ۱۹ ژنوتیپ مختلف سیب‌زمینی به‌منظور تولید غده بذری سیب‌زمینی بررسی شد. نتیجه‌گیری کلی از ارزیابی شاخص‌های مختلف تحمل و حساسیت به تنش آبی استفاده شده در پژوهش حاضر نشان داد که ژنوتیپ‌های AD15، AD50 و AD2 به‌عنوان برترین ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی و ژنوتیپ AD28 حساس‌ترین ژنوتیپ است. شاخص تحمل به تنش آبی MRP در مقایسه با سایر شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش آبی همبستگی بالاتری با عملکرد در شرایط تنش و نرمال داشت و توانست ژنوتیپ‌های متحمل به تنش آبی را گزینش کند. نمودار سه‌بعدی بر اساس شاخص تحمل به تنش آبی منتخب یعنی شاخص MRP ژنوتیپ‌های AD15، AD50 و AD2 را به‌عنوان ژنوتیپ برتر از نظر تحمل به تنش آبی شناسایی کرد. تجزیه خوشه‌ای به روش WARD نیز ژنوتیپ‌های AD15، AD50 و AD2 که تحمل بالایی به تنش آبی داشتند را در یک گروه قرار داد. با توجه به این نتایج، ژنوتیپ‌های AD15، AD50 و AD2 می‌توانند به‌عنوان نتاج متحمل به تنش آبی انتخاب و برای انجام سایر مراحل اصلاحی مورداستفاده قرار گیرد.

منابع

جانقربان، ک. ۱۴۰۴. بهبود کارایی مصرف آب در سیب‌زمینی از طریق انتخاب کلون‌های متحمل به خشکی. رساله دکتری علوم و مهندسی باغبانی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان.

درگاهی، ی.، اصغری، ع.، شکرپور، م.، رسول‌زاده، ع.، غریب‌عشقی، ا. و شیری، م. ۱۳۹۰. ارزیابی تحمل تنش کم‌آبی در ارقام کنجد بر اساس شاخص‌های تحمل. دانش کشاورزی و تولید پایدار. ۲۱(۳): ۱۳۳-۱۱۹.

زهراوی، م. ۱۳۸۸. ارزیابی ژنوتیپ‌های جو اسپانتانئوم (*Hordeum spontaneum*) از نظر شاخص‌های تحمل به خشکی. به‌نژادی نهال و بذر. ۲۵(۱): ۵۴۹-۵۳۳.

محمدپور، م.، الفتی، ج.، خالدیان، م. و ربیعی، ب. ۱۴۰۳. بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری ژنوتیپ‌های مختلف خیار گلخانه‌ای در شرایط کم آبیاری. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۸(۶): ۱۴-۱.

مهدوی، ا.، سرخی‌لله‌لو، ب.، احمدی، س. و زارع‌منش، ح. ۱۳۹۱. ارزیابی تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های جو با استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش. پژوهش‌های به‌زراعی. ۴(۲): ۱۳۳-۱۲۱.

Acosta-Gollegos, J.A. and Adams, M.W. 1991. Plant traits and yield stability of dry bean (*Phaseoulus vulgaris*) cultivar under drought stress. Journal of Agricultural Science of Cambridge. 117: 213-219.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy.

Atlin, G. N., Cairns, J. E and Das, B. 2017. Rapid breeding and varietal replacement are critical to adaptation of cropping systems in the developing world to climate change. Global food security. 12: 31-37.

Balkaya, A., Cankaya, S. and Ozbakir, M., 2011. Use of canonical correlation analysis for determination of relationships between plant characters and yield components in winter squash (*Cucurbita maxima* Duch.) populations. Bulgarian Journal of Agricultural Science.17(5):606-614.

Bouslama, 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: 933-937.

Boyer, J.S. 1982. Plant productivity and environment. Science, 218(4571): 443-448.

Clark, J.M., Depauw, R.M. and Townley-Smith, T.F. 1992. Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat. Crop Science. 32: 723-728.

Eiasu, B.K., Soundy, P., Hammes, P.S. 2007. Response of potato (*solarium tuberosum*) tuber yield components to gel-polymer soil amendments and irrigation regimes. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science. 35: 25–31.

Fang, Y. and Xiong, L. 2015. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. Cellular and molecular life sciences. 72: 673-689.

FAO. 2024. World Crop Production Statistics. http//faostat.fao.org.

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. Aug. 13-18, Taiwan. pp. 257-270. doi: 10.22001/wvc.72511.

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

Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campaline, 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: 523-531.

Gregory, P.J. and Simmonds, L.P. 1992. Water relations and growth of potatoes. In The potato crop: The scientific basis for improvement (214-246). Dordrecht: Springer Netherlands.

Hossain, A.B.S., Sears, A.G., Cox, T.S. and Paulsen, G.M. 1999. Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. Journal of Crop Science. 30: 622-627.

Lan, J. 1998. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. Acta Agriculturae Borrali-Occidentalis Sinica. 7: 85-87.

Ludlow, M.M. and Muchow, R.C. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. Advances in agronomy. 43: 107-153.

Mackerron, D.K.L. and Jefferies, R.A., 1988. The distributions of tuber sizes in droughted and irrigated crops of potato. I. Observations on the effect of water stress on graded yields from differing cultivars. Potato Research. 31 (2): 269–278.

Mark, T. and Peter, L. 2010. Breeding technologies to increase crop production in a changing world. Science. 327 (5967): 818–822.

Nouri, H., Stokvis, B., Galindoa, A., Blatchford, M. and Hoekstra, A.Y. 2019. Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: the effect of soil mulching and drip irrigation. Science of the Total Environment. 653 (2019): 241–252.

O'Connell, E., 2017. Towards adaptation of water resource systems to climatic and socio-economic change. *Water Resources Management*. *31*: 2965-2984.

Pennisi, E., 2008. The blue revolution, drop by drop, gene by gene. Science. 320(5873):171-173.

Placide, R., Shimelis, H., Laing, M. and Daphrose, G. (2016). Greenhouse and in vitro screening of

Stalham, M.A., Allen, E.J., Rosenfeld, A.B. and Herry, F.X., 2007. Effects of soil compaction in potato (Solanum tuberosum) crops. The Journal of Agricultural Science. 145 (4): 295–312.

Vos, J. and Groenwold, J. 1986. Root growth of potato crops on a marine-clay soil. *Plant and Soil*. *94*: 17-33.

Wang, H. 2021. Cucumber Economic Values and Its Cultivation and Breeding. IntechOpen. 228 pages.

Wang, X., Junliang, F., Yingying, X., Guoce, X., Haidong, W., Jian, D., Yanfeng, W., Fucang, Z., Peng, L. and Zhanbin, L. 2019. The effects of mulch and nitrogen fertilizer on the soil environment of crop plants. Advances in Agronomy. 153: 121-173.

Wang, J., Zhang, L., Cao, Y., Qi, C., Li, S., Liu, L., Wang, G., Mao, A., Ren, S. and Guo, Y.D. 2018. CsATAF1 positively regulates drought stress tolerance by an ABA-dependent pathway and by promoting ROS scavenging in cucumber. Plant and Cell Physiology. 59(5): 930-945.

Weisz, R., Kaminski, J. and Smilowitz, Z. 1994. Water deficit effects on potato leaf growth and transpiration: utilizing fraction extractable soil water for comparison with other crops. *American Potato Journal*. *71*: 829-840.

.

sweetpotato genotypes for drought tolerance. Research on Crops. 17(3): 568-578.

Qin, J., Bian, C., Liu, J., Zhang, J. and Jin, L. 2019. An efficient greenhouse method to screen potato genotypes for drought tolerance. Scientia Horticulturae. 253: 61-69.

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

Salehi-Lisar, S.Y. and Bakhshayeshan-Agdam, H., 2016. Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance. Drought stress tolerance in plants, Vol 1: physiology and biochemistry.1-16.

Schafleitner, R., Gutierrez, R., Espino, R., Gaudin, A., Pérez, J., Martínez, M., Domínguez, A., Tincopa, L., Alvarado, C., Numberto, G. and Bonierbale, M. 2007. Field screening for variation of drought tolerance in Solanum tuberosum L. by agronomical, physiological and genetic analysis. Potato Research. 50 (1): 71–85.

Schittenhelm, S., Sourell, H., Löpmeier, F.J., 2006. Drought resistance of potato cultivars with contrasting canopy architecture. European Journal of Agronomy. 24 (3): 193–202.

Water Management in Agriculture
Vol. 13, No. 1, Spring and Summer 2026, 70-84

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۳، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۵، ص. ۸۴-۷۰

Selection of Potato Genotypes Based on Tolerance and Sensitivity Indices to Water Deficit Stress

K. Janghorban[1], J. Olfati[2], M. Khaledian[3], H. Hassanabadi[4] and Y. Hamidoghli[5]

Abstract

The present study was conducted to identify genotypes tolerant to water stress, screen tolerance and sensitivity indices to water stress, and determine the best indices on 19 genotypes for the production of potato seed tubers. The experiment was conducted in split plots and in a completely randomized basic design including two levels of full irrigation and deficit irrigation (50 percent of the amount of water given in full irrigation) and with three replications using a drip irrigation system in 2022. The experiment was conducted in the greenhouse of the Pertikan Bazr Gostar Company (a producer of different classes of potato seeds) located in Minadasht city, Isfahan province. The results of this study showed that under full irrigation conditions, the AD50 genotype and under deficit irrigation conditions, the AD15 genotype produced the most commercial tubers with 18 and 20.3 tubers, respectively. Based on the number of commercial seed tubers produced under both full and deficit irrigation conditions, water stress tolerance and sensitivity indices including SSI, SI, HM, TOL, MP, YSI, GMP, STI, MRP, YI, REI, and SRI were calculated. The results of the correlation test showed that the MRP index had the highest correlation with yield under both full and deficit irrigation conditions and was the most suitable index for screening and finding superior genotypes. Based on three-dimensional diagrams and cluster analysis, the three genotypes AD15, AD50, and AD2 were introduced as superior genotypes for achieving high yield under water deficit conditions. Finally, it was shown that the three genotypes AD15, AD50, and AD2, in addition to tolerating deficit irrigation conditions, were able to have acceptable and higher yields than their parents under full irrigation conditions..

Keywords: Commercial potato tuber, Deficit irrigation, Drip irrigation,

[1] Ph.D. Student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan; P.O.BOX 41635-3756, Rasht, Iran
[2] Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Guilan, Iran
[3] Associate Professor, Department of Water Eng., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan;, Rasht, Iran, and Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center (*- Corresponding Author Email: khaledian@guilan.ac.ir)
[4] Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ardebil, Iran
[5] Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Guilan, Iran
Received: 07 Mar 2026
Accepted: 02 Oct 2025