

Evaluation of water deficit tolerance in potato genotypes under irrigation different levels using a drought tolerance index (DTI) based on growth and agronomic traits

Davoud Hassanpanah^{1*}

¹ (Corresponding author) Professor, Horticulture Crops Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research Centre, AREEO, Ardabil, Iran. Email:: D.Hassanpanah@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

ABSTRACT

Background and objectives: Deficit irrigation, as a water management strategy, is a method in which irrigation is applied below the plant's full water requirement to achieve a balance by minimizing yield reduction while increasing water use efficiency. Recent studies have shown that adjusting the timing and intensity of irrigation can enhance water use efficiency and mitigate the negative impacts of stress on tuber yield. Given the intensification of drought stress due to the water crisis and climate change, developing optimal irrigation strategies and identifying genotypes tolerant to water deficit are essential for maintaining tuber yield and increasing water use efficiency. This is particularly crucial in regions with limited water resources.

Materials and Methods: This research was conducted during the 2024–2025 growing seasons at the farm of the National Potato Research Station in Ardabil. The experiment was performed as a split-block design within a randomized complete block design (RCBD) with three replications. Traits such as tuber yield, plant height, number of main stems per plant, number and weight of tubers per plant, water consumed, and water use efficiency were measured throughout the growth period and after harvest. Additionally, growth indices such as Relative Growth Rate (RGR), Crop Growth Rate (CGR), Leaf Area Index (LAI), Leaf Area Duration (LAD), and Net Assimilation Rate (NAR) were monitored periodically (every 15 days from 30 days after planting until the end of the growth period). To evaluate the tolerance of genotypes to drought stress, the Drought Tolerance Index (DTI) was used. Principal Component Analysis (PCA) was employed to integrate and group physiological, growth, and yield characteristics, providing a unified framework for identifying drought-tolerant genotypes and optimizing yield under water-limited conditions.

Article history:

Received: 2025-03-11
Accepted: 2026-8-16

Keywords:

Deficit Irrigation
Drought Tolerance
Index
Physiological Traits
Potato (*Solanum
tuberosum* L.)
Principal Component
Analysis (PCA)

Results: The results indicated that genotypes G1043 and Eurostarch demonstrated high Drought Tolerance Index (DTI) values across all irrigation levels, identifying them as water deficit-tolerant and stable genotypes. These genotypes were able to maintain tuber yield, dry matter accumulation, and water use efficiency under both mild and severe irrigation stress conditions. The significant superiority of these two genotypes (G1043 and Eurostarch) across all irrigation levels suggests the presence of effective physiological mechanisms for coping

with drought stress. The high DTI values in these genotypes are likely due to the stability of growth indices such as LAI, CGR, and LAD, as well as efficient allocation of dry matter to tubers under drought conditions. In contrast, genotypes Arsenal, Babilon, and Sherga were significantly sensitive to drought stress. It appears that tolerant genotypes, by maintaining plant growth and photosynthesis, are capable of minimizing their yield loss under stress conditions. The gradual decrease in final DTI values with increasing drought stress intensity indicates that potato response to drought stress is highly dependent on stress intensity and growth stages. Overall, combining the evaluation of tuber yield and growth indices with the DTI provides an efficient tool for identifying drought-tolerant potato genotypes and optimizing irrigation management under water-scarce conditions.

Conclusion: The results of this study demonstrated that integrating the Drought Tolerance Index (DTI) with growth indices and agronomic traits provides a comprehensive and reliable framework for evaluating drought tolerance in potato genotypes. Based on this integrated approach, the genotypes G1043 and Eurostarch were identified as the most suitable for water-limited conditions due to their ability to maintain growth stability, tuber yield, and water use efficiency. In contrast, the genotypes Arsenal, Babilon, and Sherga exhibited greater sensitivity to water deficit. Therefore, the proposed integrated approach can improve the accuracy of selecting drought-tolerant genotypes and serve as an effective tool for potato breeding programs and the optimization of irrigation management, particularly in regions facing limited water resources.

Cite this article: Hassanpanah, D. 2026. Evaluation of water deficit tolerance in potato genotypes under irrigation different levels using a drought tolerance index (DTI) based on growth and agronomic traits. *Crop Production Journal*, 19 (2), 131-154.



© The author(s)



[10.22069/ejcp.2026.24630.2738](https://doi.org/10.22069/ejcp.2026.24630.2738)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



ارزیابی تحمل به تنش کم آبی در ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی در سطوح مختلف آبیاری با استفاده از شاخص DTI مبتنی بر صفات رشدی و زراعی

داوود حسن‌پناه^{۱*}

^۱ (نویسنده مسئول) استاد بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران، رایانامه: D.Hassanpanah@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: کم‌آبیاری به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی آب، با هدف تعادل بین حفظ عملکرد و افزایش کارایی مصرف آب توسعه یافته است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تنظیم زمان و شدت آبیاری می‌تواند کارایی مصرف آب را افزایش داده و تأثیرات منفی تنش بر عملکرد غده را کاهش دهد. با توجه به تشدید تنش‌های خشکی ناشی از بحران آب و تغییرات اقلیمی، توسعه راهبردهای بهینه آبیاری و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به کم‌آبی، برای حفظ عملکرد غده و افزایش بهره‌وری مصرف آب، امری ضروری است. این امر به ویژه در مناطق با محدودیت منابع آب اهمیت دوچندان می‌یابد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵	مواد و روش‌ها: این پژوهش طی سال‌های زراعی ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ در مزرعه ایستگاه تحقیقات ملی سیب‌زمینی شهرستان اردبیل اجرا شد. آزمایش به‌صورت طرح اسپلیت‌پلوت در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. در این طرح، سه سطح تأمین آب (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) به‌عنوان فاکتور اصلی (کرت افقی) و ۱۶ ژنوتیپ پرمحصول سیب‌زمینی به‌عنوان فاکتور فرعی (کرت عمودی) در نظر گرفته شدند. صفات عملکرد غده، ارتفاع بوته، تعداد ساقه اصلی در بوته، تعداد و وزن غده در بوته، مقدار آب مصرفی و کارایی مصرف آب، در طول دوره رشد و پس از برداشت اندازه‌گیری شدند. همچنین، شاخص‌های رشد مانند نرخ رشد نسبی (RGR)، نرخ رشد محصول (CGR)، شاخص سطح برگ (LAI)، دوام سطح برگ (LAD) و نرخ جذب خالص فتوسنتز (NAR) به‌صورت دوره‌ای (هر ۱۵ روز یک‌بار از ۳۰ روز پس از کاشت تا پایان دوره رشد) پایش گردیدند. برای ارزیابی تحمل ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی، از شاخص تحمل به خشکی (DTI) استفاده شد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌منظور تلفیق و گروه‌بندی ویژگی‌های فیزیولوژیکی، رشدی و عملکردی به‌کار رفت تا چارچوبی یکپارچه برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی و بهینه‌سازی عملکرد در شرایط محدود آب ارائه شود.
واژه‌های کلیدی: تحلیل مؤلفه‌های اصلی سیب‌زمینی شاخص تحمل به خشکی صفات فیزیولوژیکی کم‌آبیاری	یافته‌ها: نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های G1043 و Eurostarch در تمام سطوح آبیاری، مقادیر بالایی از شاخص DTI را از خود نشان دادند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به کم‌آبی و پایدار شناسایی شدند. این ژنوتیپ‌ها توانستند عملکرد غده، تجمع ماده خشک و کارایی مصرف آب را در شرایط تنش آبیاری ملایم و شدید حفظ نمایند. برتری قابل توجه این دو ژنوتیپ (G1043 و

Eurostarch) در تمامی سطوح آبیاری، حاکی از وجود مکانیسم‌های فیزیولوژیکی مؤثری برای مقابله با تنش خشکی در آن‌ها است. مقادیر بالای DTI در این ژنوتیپ‌ها احتمالاً ناشی از پایداری شاخص‌های رشدی مانند LAI، CGR و LAD و همچنین تخصیص مؤثر ماده خشک به غده‌ها در شرایط خشکی بوده است. در مقابل، ژنوتیپ‌های Babilon، Arsenal و Sherga به‌طور قابل توجهی به تنش خشکی حساس بودند. به نظر می‌رسد ژنوتیپ‌های متحمل، با حفظ رشد گیاه و تداوم فتوسنتز، قادر به کاهش حداقل عملکرد خود تحت شرایط تنش هستند. کاهش تدریجی مقادیر نهایی DTI با افزایش شدت تنش خشکی، بیانگر این مطلب است که پاسخ سیب‌زمینی به تنش خشکی به شدت تنش و مراحل رشد وابسته است. در مجموع، ترکیب ارزیابی عملکرد غده و شاخص‌های رشد با شاخص DTI، ابزار کارآمدی برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در سیب‌زمینی و مدیریت بهینه آبیاری در شرایط کم‌آبی فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که تلفیق شاخص تحمل به خشکی (DTI) با شاخص‌های رشد و صفات زراعی، چارچوبی جامع و قابل اعتماد برای ارزیابی تحمل ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی به کم‌آبی فراهم می‌کند. بر این اساس، ژنوتیپ‌های G1043 و Eurostarch به دلیل حفظ پایداری رشد، عملکرد غده و کارایی مصرف آب، به عنوان مناسب‌ترین ژنوتیپ‌ها برای شرایط کم‌آبی معرفی شدند، در حالی که ژنوتیپ‌های Babilon، Arsenal و Sherga حساسیت بیشتری به محدودیت آب نشان دادند. بنابراین، استفاده از این رویکرد تلفیقی می‌تواند دقت انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل را افزایش داده و در برنامه‌های اصلاحی و مدیریت بهینه آبیاری، به ویژه در مناطق دارای محدودیت منابع آب، مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: حسن پناه، داوود. (۱۴۰۵). ارزیابی تحمل به تنش کم‌آبی در ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی در سطوح مختلف آبیاری با استفاده از شاخص DTI مبتنی بر صفات رشدی و زراعی. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۹ (۲)، ۱۵۴-۱۳۱.



[10.22069/ejcp.2026.24630.2738](https://doi.org/10.22069/ejcp.2026.24630.2738)

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان



مقدمه

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی و صنایع فرآوری (از جمله نشاسته، چیپس، خلال، الکل و ...) جهان است که به دلیل مصرف گسترده و ارزش غذایی بالا در سطح وسیعی از مناطق کشاورزی کشت می‌شود و نقش مهمی در امنیت غذایی و تأمین نشاسته، پروتئین و مواد معدنی دارد (۱). این گیاه در اکثر مناطق جهان کشت می‌شود، اما به دلیل نیاز آبی نسبتاً بالا و سیستم ریشه‌ای کم‌عمق، به تنش خشکی بسیار حساس است و کمبود آب می‌تواند باعث کاهش رشد رویشی، کاهش فتوسنتز، کاهش تجمع ماده خشک و افت عملکرد غده‌ها شود (۲ و ۳). با توجه به محدودیت منابع آب و افزایش فشارهای محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی، بهره‌وری مصرف آب به یکی از مهم‌ترین شاخص‌های پایداری در کشاورزی مدرن تبدیل شده است (۴). تنش خشکی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود و با تشدید تغییرات اقلیمی، دوره‌ها و شدت خشکی طولانی‌تر می‌شود (۲). سیب‌زمینی، با وجود این‌که در مقایسه با بسیاری از گیاهان C_3 از بهره‌وری مصرف آب بالاتری برخوردار است، به دلیل برخورداری از سیستم ریشه‌ای کم‌عمق و حساسیت به تنش کم‌آبی در مراحل مختلف رشد، نیازمند به‌کارگیری راهبردهای بهینه مدیریت آب و انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل برای حفظ پایداری عملکرد است (۵). کم-آبیاری^۱ به عنوان یک راهبرد مدیریتی آب، با کاهش آبیاری، تلاش می‌شود کارایی مصرف آب^۲ افزایش یابد و در عین حال، افت عملکرد به حداقل ممکن برسد (۶). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با تنظیم

زمان و شدت کم‌آبیاری، می‌توان بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد و اثر منفی تنش بر عملکرد غده را کاهش داد (۵ و ۷). پاسخ سیب‌زمینی به تنش خشکی به مرحله رشد، ژنوتیپ و شدت تنش وابسته است. کاهش آب در مراحل بحرانی مانند گسترش غده و انباشت نشاسته اثر منفی بیشتری بر عملکرد دارد، در حالی که کم‌آبیاری در مراحل اولیه رشد ممکن است اثرات منفی کمتری داشته باشد (۷). در یک مطالعه میدانی در منطقه بیابانی شمال غرب چین، اعمال کم‌آبیاری ملایم در مرحله تشکیل غده، بدون کاهش معنی‌دار عملکرد، موجب افزایش معنی‌دار بهره‌وری مصرف آب شد (۷). با توجه به این‌که مطالعه در شرایط محدودیت منابع آب انجام شده‌اند، این نتایج اهمیت به‌کارگیری راهبردهای کم‌آبیاری را برای افزایش بهره‌وری مصرف آب و حفظ عملکرد سیب‌زمینی در مناطق کم‌آب تأیید می‌کند. تنوع ژنوتیپی در پاسخ به خشکی نشان می‌دهد که برخی ژنوتیپ‌ها با حفظ فتوسنتز، توسعه تاج و انتقال ماده خشک به غده‌ها، عملکرد خود را در شرایط کم‌آبیاری بهتر حفظ می‌کنند (۵ و ۸). برای ارزیابی تحمل خشکی، شاخص‌هایی مانند شاخص تحمل به خشکی (DTI)^۳ و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۴ ابزارهای موثری هستند. این شاخص‌ها با ترکیب داده‌های مورفولوژیک، فیزیولوژیک و عملکردی، امکان شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم و حساس را فراهم می‌کنند و به محققان و تولیدکنندگان کمک می‌کنند تا ژنوتیپ‌های مناسب برای مناطق خشک را انتخاب کنند (۹ و ۱۰). تحلیل PCA در ترکیب با DTI امکان دسته‌بندی ژنوتیپ‌ها از متحمل تا بسیار حساس را فراهم کرده و ابزاری قوی برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل ارائه می‌دهد (۳ و ۴). لی و همکاران (۲۰۲۵)

³ Drought Tolerance Index (DTI)⁴ Principal Component Analysis (PCA)¹ Deficit Irrigation (DI)² Water Use Efficiency (WUE)

با بررسی ۲۴ شاخص مورفوفیزیولوژیک و عملکردی نشان دادند تحلیل مؤلفه‌های اصلیه‌مراه با تحلیل خوشه‌ای به تفکیک ژنوتیپ‌های مقاوم تا حساس کمک کرده و معیارهای قابل اعتمادی برای انتخاب ژنوتیپ‌های دارای تحمل به خشکی فراهم آورده است (۹). شاخص‌های رشد مانند نرخ تجمع ماده خشک (CGR)، نرخ رشد نسبی (RGR)، شاخص سطح برگ (LAI) و دوام سطح برگ (LAD) ابزارهای کلیدی برای بررسی پویایی رشد، تخصیص ماده خشک و پاسخ فیزیولوژیک گیاه به تنش هستند (۱۱). علاوه بر این، شاخص‌های پایش غیرمخرب مانند دمای تاج گیاهی و شاخص سبزی برگ نیز می‌توانند در ارزیابی وضعیت آبی گیاه و بهبود مدیریت آبیاری مفید باشند (۱۲). این شاخص‌ها نشان‌دهنده کارایی گیاه در جذب و بهره‌برداری از منابع، از جمله تابش، تبادل گازی و تخصیص ماده خشک به اندام‌های مختلف هستند و نشان می‌دهند چه میزان از این منابع در نهایت به تشکیل و رشد غده‌ها اختصاص می‌دهند (۶). در این راستا، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که با بهره‌گیری از این شاخص‌ها و تنظیم دقیق آبیاری در مراحل حساس، می‌توان بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد و کاهش عملکرد غده را محدود کرد (۶). بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی نشان داده‌اند که پاسخ سیب‌زمینی به کم‌آبی به ژنوتیپ، مرحله رشد و شدت تنش بستگی دارد؛ به‌طوری‌که ژنوتیپ‌های متحمل، با حفظ رشد اندام هوایی، تجمع ماده خشک و عملکرد غده، کاهش عملکرد کمتری نسبت به ژنوتیپ‌های حساس نشان می‌دهند (۷). بررسی‌های اخیر نشان داده‌اند که روش‌های زمان‌بندی آبیاری می‌تواند بهره‌وری آب و کیفیت عملکرد سیب‌زمینی را بهبود بخشد (۱۳). تنش خشکی نه تنها رشد کلی گیاه را محدود می‌کند، بلکه تشکیل غده‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۴).

فلکس و میدرونو (۲۰۰۲) نشان دادند تنش آبی باعث کاهش فعالیت فتوسنتز می‌شود و این کاهش از طریق مکانیسم‌هایی مانند کاهش میزان CO_2 در فضای بین سلولی برگ‌ها تغییر در مسیرهای فتوسنتزی اتفاق می‌افتد. همچنین، اثرات تنش آبی بر سطح کل گیاه از طریق تغییر در عملکرد ریشه، توزیع آب و تغییر در میزان رشد و تولید گیاه اتفاق می‌افتد (۱۵). تنش آب خاکی نه تنها رشد کلی گیاه را محدود می‌کند، بلکه تشکیل و کیفیت نشاسته در غده‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۴). فلکس و میدرونو (۲۰۰۲) اعلام کردند تنش آبی باعث کاهش فعالیت فتوسنتز می‌شود و این کاهش از طریق مکانیسم‌هایی مانند کاهش میزان CO_2 داخل لبه برگ و تغییر در مسیرهای فتوسنتزی اتفاق می‌افتد. همچنین، اثرات تنش آبی بر سطح کل گیاه از طریق تغییر در عملکرد ریشه، توزیع آب و تغییر در میزان رشد و تولید گیاه اتفاق می‌افتد (۱۵). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تحمل به خشکی در سیب‌زمینی صفتی پیچیده و چندزنی است و ارزیابی آن تنها بر پایه یک صفت یا شاخص، نمی‌تواند پاسخ واقعی ژنوتیپ‌ها را منعکس کند. در این زمینه، موننو و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که ارزیابی هم‌زمان صفات فیزیولوژیکی، شاخص‌های رشد، عملکرد غده و کارایی مصرف آب، نسبت به استفاده از یک شاخص منفرد، دقت بیشتری در شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی فراهم می‌کند و از این رو، استفاده از رویکردهای چندصفتی را در برنامه‌های اصلاحی سیب‌زمینی توصیه کردند (۱۶). در ادامه، رامیرز و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که پاسخ ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی به تنش خشکی حاصل برهم‌کنش ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و عملکردی است و تلفیق این صفات، امکان تفکیک دقیق‌تر ژنوتیپ‌های متحمل و حساس را فراهم می‌سازد (۱۷). همچنین، گرواس و همکاران (۲۰۲۱)

مورفولوژیکی، شاخص‌های رشد و شاخص تحمل به خشکی (DTI) و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و کارآمد از نظر بهره‌وری مصرف آب بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور ارزیابی ۱۶ ژنوتیپ سیب‌زمینی، طی دو فصل زراعی ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴، در مزرعه ایستگاه تحقیقات سیب‌زمینی کشور واقع در شهرستان اردبیل اجرا شد. در هر دو سال، کشت در اوایل اردیبهشت انجام شد و برداشت در اواخر مرداد تا اوایل شهریور صورت گرفت. ژنوتیپ‌های مورد بررسی در این آزمایش شامل ارقام تجاری داخلی و خارجی با کاربردهای مختلف (چیپس، خلال، نشاسته، سرخ‌کردن، تازه‌خوری و چندمنظوره) بودند (جدول ۱). آزمایش به صورت اسپلیت بلوک بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. که در آن کرت‌های اصلی (افقی) شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه) و کرت‌های فرعی (عمودی) شامل ۱۶ ژنوتیپ سیب‌زمینی بودند. محل اجرای آزمایش دارای اقلیم معتدل و نیمه‌سردسیر با رطوبت نسبتاً کم بود. این ایستگاه در ارتفاع ۱۳۹۲ متر از سطح دریا و عرض جغرافیایی ۳۸° ۱۵' و طول جغرافیایی آن به ترتیب ۴۸° ۲۰ قرار دارد. میزان بارندگی در سال ۱۴۰۳، به مقدار ۳۸۶/۴ میلی‌متر (نسبت به میانگین بلندمدت، ۷/۳ درصد بیشتر) و در سال ۱۴۰۴، به مقدار ۲۲۶/۵ میلی‌متر (نسبت به میانگین بلندمدت در این بازه زمانی، ۱۸ درصد کمتر) بوده است (جدول ۲). هر کرت آزمایشی شامل سه ردیف به طول ۵ متر بود و غده‌ها به صورت جوی و پشته‌ای، با فاصله ۷۵ سانتی‌متر بین ردیف‌ها و ۲۵ سانتی‌متر بین بوته‌ها، در عمق ۱۰ سانتی‌متری کشت شدند. نمونه‌برداری‌ها و ثبت صفات از ردیف وسطی انجام شد. روش آبیاری

گزارش کردند که ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی از نظر ویژگی‌های فیزیولوژیکی، رشد، عملکرد غده و کارایی مصرف آب، واکنش‌های متفاوتی به تنش خشکی نشان می‌دهند و استفاده هم‌زمان از این صفات، دقت شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل را افزایش می‌دهد (۱۸). هیل و همکاران (۲۰۲۱) نیز با مرور جامع مطالعات انجام‌شده بر سیب‌زمینی، بر اهمیت به‌کارگیری هم‌زمان شاخص‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و عملکردی در ارزیابی تحمل به خشکی، انتخاب ژنوتیپ‌های برتر و بهینه‌سازی مدیریت آبیاری تأکید کردند (۱۹). در همین راستا، نصیر و توف (۲۰۲۲) نیز نشان دادند که تلفیق صفات مرتبط با رشد و انتقال آب، دقت شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل را افزایش می‌دهد (۲۰). بر این اساس، استفاده هم‌زمان از شاخص تحمل به خشکی (DTI)، شاخص‌های رشد و صفات زراعی، می‌تواند ارزیابی جامع‌تر و دقیق‌تری از پاسخ ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی به کم‌آبی فراهم کرده و مبنای مناسبی برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و بهبود مدیریت آبیاری در برنامه‌های اصلاحی باشد.

اگرچه مطالعات متعددی اثر کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در سیب‌زمینی را بررسی کرده‌اند، اغلب این پژوهش‌ها بر تعداد محدودی از صفات زراعی یا شاخص‌های فیزیولوژیکی تمرکز داشته و ارزیابی تلفیقی شاخص‌های رشد، صفات زراعی و شاخص تحمل به خشکی (DTI) برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، بهره‌گیری از رویکردی یکپارچه می‌تواند درک دقیق‌تری از پاسخ ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی به کم‌آبی فراهم کرده و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر را برای برنامه‌های به‌نژادی و مدیریت آبیاری تسهیل کند. بر این اساس، هدف این پژوهش ارزیابی پاسخ ۱۶ ژنوتیپ سیب‌زمینی به سطوح مختلف کم‌آبیاری با استفاده از تلفیق صفات

α: ضریب بهره‌وری بارش (برای خاک لومی رسی
 $\alpha = 0.75$).

برای مبارزه با علف‌های هرز بعد از کاشت و قبل از سبز شدن بوته‌های سیب‌زمینی از سم سنکور به مقدار ۷۵۰ گرم در هکتار و برای مبارزه با آفت سوسک کلرادو از سم کنفیدور به مقدار ۲۵۰ میلی‌لیتر در هکتار در یک نوبت استفاده شد. خاک‌دهی پای بوته در دو مرحله انجام شد؛ مرحله اول، بین ۱۵ تا ۲۰ روز بعد از سبز شدن بوته‌ها، زمانی که ارتفاع بوته‌ها حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر بود، و مرحله دوم، ۲۵ تا ۳۰ روز بعد از سبز شدن، زمانی که ارتفاع بوته‌ها به ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متر رسید و غده‌ها در آغاز تشکیل بودند. مصرف کودهای اوره در سه مرحله به مقدار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار (یک سوم در زمان کاشت، یک سوم در زمان وجین علف‌های هرز و یک سوم در زمان خاک‌دهی پای بوته)، کود فسفات آمونیوم به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در دو مرحله (۵۰ درصد در زمان کاشت و ۵۰ درصد در مرحله غده‌دهی) و کود سولفات پتاسیم به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در زمان کاشت براساس آزمایش خاک (جدول ۴) مورد استفاده قرار گرفت.

به صورت قطره‌ای (تیپ) انجام شد. مقدار آب ورودی به هر کرت آزمایشی با کنتور آب اندازه‌گیری شد. برای تعیین حجم آب مصرفی در هر آبیاری، قبل از آبیاری نمونه‌برداری از خاک کرت مورد نظر تا عمق توسعه ریشه انجام گرفت و درصد رطوبت خاک محل آزمایش در طول دوره رشد سیب‌زمینی با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج پرتابل PMS-714 اندازه‌گیری حجم آب آبیاری با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه و تیمارها بر اساس آن اعمال گردید (جدول ۳).

$$H = pb (\theta_{FC} - \theta_m) D$$

$$V = H \times A$$

H: نشان دهنده ارتفاع آب داخل کرت، pb: جرم مخصوص ظاهری خاک، θ_{FC} : رطوبت در حد ظرفیت مزرعه، θ_m : رطوبت جرمی کرت مورد نظر در زمان آبیاری، D: عمق توسعه ریشه، V: حجم آب آبیاری در کرت و A: مساحت کرت برای محاسبه بارش موثر و شاخص بهره‌وری آب، از روش زیر استفاده شد:

– محاسبه بارش موثر (Pe) (۲۱):

$$Pe = P \times \alpha$$

که در آن:

P: مجموع بارش‌های دوره (مترمکعب).

جدول ۱- ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی مورد بررسی و خصوصیات مهم آنها

Table 1. Studied potato genotypes and their important characteristics

ژنوتیپ (Genotypes)	شکل غده (Tuber Shape)	دوره خواب (Dormancy)	زمان رسیدگی (Maturity)	رنگ گوشت (Flesh Color)	رنگ پوست (Skin color)	عملکرد غده قابل فروش (Marketable Tuber Yield)	انبارداری (Storage)	مناسب برای (Suitable for)
لاریسا (Larissa)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط زودرس Mild Early	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	چپس Chips
آگریا (Agrida)	بیضی کشیده Elongated Oval	بالا High	متوسط دیررس Mild Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خلال Sliced
جلی (Jelly)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط دیررس Mild Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خلال Sliced
ساولان (Savalan)	گرد بیضی Round Oval	متوسط Medium	متوسط دیررس Mild Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	متوسط Medium	چپس Chips
آتوسا (Atosa)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط دیررس Mild Late	زرد روشن Light Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	سرخ کردن Frying
روزا (Roza)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط دیررس Mild Late	زرد Yellow	قرمز Red	بالا High	خوب Good	خلال Sliced
ریلانا (Rilana)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط زودرس Mild Early	زرد Yellow	زرد Yellow	خیلی بالا Very high	خوب Good	تازه خوری Fresh food
بایلون (Babylon)	بیضی کشیده Elongated Oval	خوب Good	متوسط زودرس Mild Early	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خلال Sliced
آرسنال (Arsenal)	گرد بیضی Round Oval	خوب Good	متوسط زودرس Mild Early	زرد روشن Light Yellow	زرد Yellow	خیلی بالا Very high	خوب Good	چپس Chips
پرنس (Prince)	کشیده Elongated	عالی Excellent	متوسط دیررس Mild Late	سفید White	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خلال Sliced
یوروستارچ (Eurostarch)	گرد بیضی Round Oval	عالی Excellent	متوسط دیررس Mild Late	سفید White	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	نشاسته Starch
سروگا (Serga)	گرد بیضی Round Oval	خوب Good	متوسط دیررس Mild Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	سرخ کردن Frying
به زبان مجارستانی (به زبان مجارستانی)	بیضی کشیده Elongated Oval	خوب Good	متوسط دیررس Mild Late	کرمی Cream	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	تازه خوری Fresh food
تکتا (Takta)	بیضی کشیده Elongated Oval	خوب Good	متوسط دیررس Mild Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	تازه خوری Fresh food
جاولید (Javid)	گرد بیضی Round Oval	خوب Good	متوسط دیررس Mild Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	تازه خوری Fresh food
ژنوتیپ ۱۰۴۳ (مجارستانی)	بیضی Oval	بالا High	متوسط زودرس Mild Early	زرد روشن Light Yellow	زرد Yellow	خیلی بالا Very high	طلایی Long	سرخ کردن Frying

جدول ۲- مقدار بارندگی موثر (متر مکعب در مساحت ۱۱/۲۵ مترمربع)

Table 2. Effective rainfall (m3 per 11.25 square meter area)

Month ماه	2024	2025
May اردیبهشت	0.58	0.67
June خرداد	0.35	0.47
July تیر	0.20	0.32
August مرداد	0.00	0.00
September شهریور	0.00	0.00

جدول ۳- میزان آب مصرفی در مراحل رشد سیب زمینی و تیمارهای آبیاری (لیتر در مساحت ۱۱/۲۵ مترمربع)

Table 3. Water consumption at different potato growth stages and irrigation treatments (liters per 11.25 square meter area)

مراحل آبیاری (Irrigation stages)	100%	80%	60%
planting کاشت	100	80	60
Planting till beginning of tuberization کاشت تا شروع غده‌زایی در هر نوبت	150	120	90
Beginning of tuberogenesis till the harvesting of the tuberها شروع غده‌زایی تا برداشت غده‌ها	200	160	120

جدول ۴- ویژگی‌های شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2. Chemical properties of the soil at the test site

ویژگی‌های شیمیایی (Chemical properties)	مقدار (Amount)	ویژگی‌های شیمیایی (Chemical properties)	مقدار (Amount)
Salinity شوری (ds/m)	1.36	Absorbable Phosphorus (ppm) فسفر قابل جذب	4.72
pH	7.4	Absorbable Potassium (ppm) پتاسیم قابل جذب	274
Percent Saturation درصد اشباع	42	Zinc (ppm) روی	6.88
Percent Lime درصد آهک	4.05	Iron (ppm) آهن	6.92
		Copper (ppm) مس	7.4
Percent Organic Carbon درصد کربن آلی	0.78	Manganese (ppm) منگنز	15.04
Percent Total Nitrogen درصد نیتروژن کل	0.07	-	-
		Texture بافت	Clay loam لومی رسی

Yield: عملکرد غده قابل برداشت در واحد سطح؛
 WA: کل آب مصرف شده در واحد سطح
 اندازه‌گیری شاخص‌های رشد: شاخص‌های رشد شامل شاخص سطح برگ (Leaf Area Index, LAI)، نرخ رشد نسبی (Relative Growth Rate, RGR)، نرخ رشد محصول (Crop Growth Rate, CGR)، نرخ جذب خالص (Net Assimilation Rate, NAR) و دوام سطح برگ (Leaf Area Duration, LAD) از ۳۰ روز پس از کاشت آغاز و تا پایان فصل رشد، هر ۱۵

در طی دوره رشد و پس از برداشت صفات عملکرد غده، ارتفاع بوته، تعداد ساقه اصلی در بوته، تعداد و وزن غده در بوته و متوسط وزن غده، درصد ماده خشک غده، مقدار آب مصرفی و کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شد. کارایی مصرف آب (WUE) به شرح ذیل محاسبه شد.

$$WUE = \frac{Yield}{WA} \times 100$$

WUE: کارایی مصرف آب؛

CGR: نرخ رشد محصول، با واحد $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$

• **نرخ رشد نسبی (RGR):** تغییرات وزن خشک بر واحد وزن خشک در واحد زمان بین دو نمونه‌برداری متوالی (۱۱).

$$RGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$$

که در آن:

W_1 : وزن خشک کل گیاه در نمونه‌برداری اول (g)

W_2 : وزن خشک کل گیاه در نمونه‌برداری دوم (g)

t_1 و t_2 : زمان‌های نمونه‌برداری اول و دوم (روز)

$\ln$: لگاریتم طبیعی

RGR: نرخ رشد نسبی (g g^{-1} یا day^{-1})

• **نرخ جذب خالص (NAR):** افزایش وزن خشک

در واحد سطح برگ و زمان بین دو نمونه‌برداری

متوالی (۱۱).

$$NAR = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \times \frac{\ln A_2 - \ln A_1}{A_2 - A_1}$$

که در آن:

W_1 و W_2 : وزن خشک کل گیاه در دو زمان

نمونه‌برداری (g)

A_1 و A_2 : سطح برگ (Leaf Area) در دو زمان

نمونه‌برداری (cm^2 یا m^2)

t_1 و t_2 : زمان‌های نمونه‌برداری (روز)

$\ln$: لگاریتم طبیعی

NAR: نرخ جذب خالص ($\text{g m}^{-2} \text{ leaf day}^{-1}$)

• **دوام سطح برگ (LAD):** مدت زمان فعالیت مؤثر

فتوسنتزی برگ‌ها بر اساس تغییرات LAI در طول

زمان (۱۱).

$$LAD = \frac{LAI_1 + LAI_2}{2} \times (t_2 - t_1)$$

که در آن:

LAI: شاخص سطح برگ در نمونه‌برداری اول

LAI: شاخص سطح برگ در نمونه‌برداری دوم

t : زمان‌های نمونه‌برداری (روز)

LAD: دوام سطح برگ $\text{m}^2 \text{ day m}^{-2}$

روز یک‌بار اندازه‌گیری شدند (۱۱). در هر مرحله نمونه‌برداری، پنج بوته از سطح یک مترمربع هر تیمار انتخاب و برداشت شدند. سپس صفات رشدی شامل وزن تر و وزن خشک اندام‌های مختلف گیاه (برگ، ساقه، ریشه و غده)، سطح کل برگ، ارتفاع بوته، میانگین وزن غده، تعداد غده در بوته و وزن غده در بوته اندازه‌گیری شد. شاخص‌های رشد با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند:

• **شاخص سطح برگ (LAI):** نسبت سطح کل برگ‌ها

به سطح زمین اشغال‌شده توسط گیاه (۱۱).

$$LAI = \frac{\text{Total leaf area}}{\text{Ground area}}$$

که در آن:

Leaf area Total: سطح کل برگ‌های گیاه (m^2)

Ground area: سطح زمین اشغال‌شده توسط گیاه (m^2)

LAI: شاخص سطح برگ (بدون واحد)

• **نسبت سطح برگ (LAR):** نسبت سطح برگ به

وزن خشک کل گیاه در هر زمان نمونه‌برداری

(۱۱).

$$LAR = \frac{\text{Leaf area}}{\text{Total dry weight}}$$

که در آن:

Leaf area: سطح برگ (cm^2 یا m^2)

Total dry weight: وزن خشک کل گیاه (g)

LAR: نسبت سطح برگ ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ یا $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$)

• **نرخ رشد محصول (CGR):** افزایش وزن خشک

در واحد سطح زمین و در واحد زمان بین دو

نمونه‌برداری متوالی (۱۱).

$$CGR = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \times \frac{1}{GA}$$

که در آن:

W_1 و W_2 : وزن خشک کل گیاه (g) در زمان‌های اول و

دوم نمونه‌برداری

t_1 و t_2 : زمان نمونه‌برداری اول و دوم (روز)

GA (Ground area): سطح زمین اشغال‌شده توسط

گیاه یا سطح کرت (m^2)

مناسب برای مصارف مختلف برای منطقه اردبیل معرفی شدند.

نتایج و بحث

نتایج میانگین مربعات مرکب براساس امیدریاضی صفات مورد مطالعه نشان داد بین سطوح تنش کم آبی، ژنوتیپ‌ها، اثر متقابل ژنوتیپ‌ها و سال، اثر متقابل تنش کم آبی و ژنوتیپ‌ها و اثر متقابل سه جانبه تنش کم آبی، ژنوتیپ‌ها و سال از لحاظ صفات عملکرد غده و کارایی مصرف آب و بین سطوح تنش کم آبی، ژنوتیپ‌ها و اثر متقابل تنش کم آبی و ژنوتیپ‌ها از لحاظ درصد ماده خشک غده اختلاف معنی دار مشاهده شد (جدول ۵). (با توجه به تعداد زیاد صفات اندازه‌گیری شده، تنها نتایج مهم‌ترین صفات در این قسمت ارائه شده‌اند. با این حال، شاخص تحمل به خشکی (DTI) بر اساس تمامی صفات اندازه‌گیری شده شامل صفات زراعی، فیزیولوژیک و شاخص‌های رشد محاسبه شد).

مقایسه میانگین اثر متقابل رقم و سطوح آبیاری نشان داد بیشترین عملکرد غده و کارایی مصرف آب در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد (شرایط نرمال)، ۸۰ درصد (تنش ملایم) و ۶۰ درصد (تنش شدید) مربوط به ژنوتیپ G1043 و ارقام Eurostarch و Javid بودند. بیشترین درصد ماده خشک غده در ارقام Savalam و Rona در تیمارهای مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد بدست آمد (جدول ۶). میزان کاهش عملکرد غده در شرایط تنش ملایم ۱/۴ درصد و در شرایط تنش شدید ۳۲ درصد مشاهده شد. درصد ماده خشک غده و کارایی مصرف آب در ارقام متحمل به کم آبی در شرایط تنش ملایم و شدید افزایش نشان داد (جدول ۶).

محاسبه شاخص تحمل به خشکی (DTI): به منظور ارائه یک شاخص جامع برای ارزیابی تحمل به کم آبی، از یک شاخص ترکیبی مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. پس از استانداردسازی داده‌ها (۲۲)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام و وزن هر مؤلفه بر اساس سهم واریانس تبیین شده آن تعیین شد (۲۳).

استانداردسازی داده‌ها به روش استاندارد (Z-score):

$$Z = (X - \bar{X}) / SD$$

سپس شاخص نهایی به صورت مجموع وزنی مؤلفه‌ها محاسبه گردید (۲۳ و ۲۴):

$$DTI_{Final} = W_{PC1} \times DTI_{Z} + W_{PC2} \times DTI_{Z}$$

شاخص‌های رشد DTI

که در آن:

$$W_{PC1} = EV1 / (EV1 + EV2)$$

$$W_{PC2} = EV2 / (EV1 + EV2)$$

که در آن:

WPCi: وزن مؤلفه اصلی i

EVi: سهم واریانس تبیین شده (Explained

Variance) مؤلفه اصلی i

در نهایت، به منظور تسهیل تفسیر نتایج، ژنوتیپ‌ها بر اساس مقادیر شاخص نهایی در پنج گروه تحمل طبقه‌بندی شدند. این طبقه‌بندی به عنوان یک چارچوب عملیاتی در پژوهش حاضر برای مقایسه نسبی ژنوتیپ‌ها به کار گرفته شد (۲۵).

متحمل 1: DTI > 1 Tolerant

نیمه متحمل 0.5 ≤ DTI ≤ 1 Semi tolerant

نسبتاً متحمل 0 ≤ DTI ≤ 0.5 Fairly tolerant

حساس 0 < DTI ≤ -0.5 Sensitive

بسیار حساس DTI < -0.5 Very sensitive

تجزیه واریانس با نرم افزار آماری SAS 9.1

صورت گرفت. مقایسه میانگین صفات با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. در نهایت ارقام پرمحصول و متحمل به تنش کم آبی و

جدول ۵- میانگین مربعات صفات مورد مطالعه ارقام سیب‌زمینی در تیمارهای تنش کم آبی طی دو سال آزمایش

Table 5. Mean squares of studied traits of potato cultivars in water deficit stress treatments during two years of experiment

منابع تغییر Source of Variation	درجه آزادی Degree of Freedom	میانگین مربعات Meen Square		
		عملکرد غده Tuber yield	کارایی مصرف آب Water use efficiency	درصد ماده خشک غده Tuber dry matter percentage
سال Year (Y)	1	348.3	10.79	0.021
Error 1	4	435.6	14.64	0.072
Water Deficit Stress (A) تنش کم آبی	2	6422.1**	11.11**	19.68**
Y × A	2	27.8	0.22	0.021
Error 2	8	16.8	0.31	0.013
Cultivars (B) ارقام	15	10179.1**	24.34**	17.07**
Y × B	15	58.5*	2.25*	0.017
Error 3	60	32.8	1.15	0.022
A × B	30	20.5**	0.99**	1.193**
Y × A × B	30	15.5*	0.23**	0.017
Error 4	120	9.6	0.36	0.034
Coefficient of variation (%) ضریب تغییرات (درصد)	-	10.21	10.69	5.86

* و **: معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد

* and **: significance at the five and one percent probability levels

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه در تیمار تنش کم آبی و ارقام سیب‌زمینی

Table 6. Mean comparison of studied traits in water deficit stress treatments and potato cultivars

کارایی مصرف آب Water use efficiency	درصد ماده خشک غده Tuber dry matter percentage	عملکرد غده Tuber yield	ارقام Cultivars	سطح آبیاری Irrigation level
6.850 cdef	20.64 nopq	48.62 ab	1043 ۱۰۴۳	
5.456 jklm	22.13 fgh	37.29 efg	Savalan ساوالان	
4.538 opqrst	22.95 c	31.02 ijklmno	Rona رونا	
5.062 lmnopq	20.58 opqr	34.60 fgh	Agria آگریا	
7.008 cde	21.13 lm	47.90 a	Eurostarch یورو استارچ	
4.682 nopqrs	20.55 pqr	32.00 hijklm	Larisa لاریسا	
5.646 ijkl	18.81 v	38.59 e	Takta تکتا	۱۰۰ درصد آب
5.676 ijkl	21.62 ijk	38.80 de	Atoosa آتوسا	قابل استفاده
4.784 mnopqr	20.23 rst	37.20 hijkl	Prince پرنس	100% of the plant's available water
6.422 efgh	20.64 nopq	43.89 bc	Javid جاوید	
6.400 efgh	20.97 lmn	43.74 bc	Roza رزا	
4.502 pqrst	20.97 lmn	30.77 jklmnop	Jely جلی	
4.577 opqrst	22.52 de	31.28 hijklmn	Serga شرگا	
4.082 stu	19.67 u	27.90 nopqrs	Arsenal آرسنال	
4.251 rst	21.06 lm	29.05 mnop	Babylon بابیلون	
4.099 stu	20.11 st	28.02 nopqrs	Rilana ریلانا	
7.706 ab	21.31 kl	42.13 cd	1043 ۱۰۴۳	
6.228 fghi	22.78 cd	24.05 ghij	Savalan ساوالان	۸۰ درصد آب
6.043 ghij	23.82 b	33.04 hijkl	Rona رونا	قابل استفاده
5.055 lmnopq	20.45 qrs	27.64 opqrst	Agria آگریا	80% of the plant's available water
7.406 bc	21.83 ghij	40.49 cde	Eurostarch یورو استارچ	
5.286 klmn	20.78 mnopq	28.90 mnopq	Larisa لاریسا	

کارایی مصرف آب Water use efficiency	درصد ماده خشک غده Tuber dry matter percentage	عملکرد غده Tuber yield	ارقام Cultivars	سطح آبیاری Irrigation level
6.038 ghij	20.90 mnop	33.01 hijkl	Takta تکتا	
6.298 fghi	22.14 fgh	34.43 fghi	Atoosa آتوسا	
5.168 lmnop	20.06 t	28.25 nopqr	Prince پرنس	
6.878 cdef	20.83 mnop	37.60 ef	Javid جاوید	
5.907 hijk	21.00 lmn	32.29 hijklm	Roza رزا	
3.949 tu	21.02 lm	21.59 wxy	Jely جلی	
4.304 rst	22.33 ef	23.53 uvwx	Serga شرگا	
4.352 rst	20.23 rst	23.79 uvw	Arsenal آرسنال	
4.529 opqrst	20.95 lmn	24.76 rstuvw	Babylon بابیلون	
4.442qrst	20.55 pqr	24.28 tuv	Rilana ریلانا	
7.056 a	21.89 ghi	33.27 hijkl	1043 ۱۰۴۳	
6.139 bcde	23.05 c	28.96 mnopq	Savalan ساوالان	
5.323 ghij	24.84 a	25.20 rstuv	Rona رونا	
8.189 klmn	21.50 jk	21.85 vwxy	Agria آگریا	
6.018 a	22.03 fgh	33.60 hijk	Eurostarch یوروستارچ	
6.206 ghij	20.93 mno	24.70 stuvw	Larisa لاریسا	
7.281 fghi	21.00 lmn	25.47 qrstu	Takta تکتا	۶۰ درصد آب
5.207 bcd	22.78 cd	29.88 lmnop	Atoosa آتوسا	قابل استفاده
7.383 lmno	20.93 mno	21.37 wxy	Prince پرنس	60% of the
6.677 bc	20.94 mno	30.30 klmnop	Javid جاوید	plant's
4.504 defg	21.05 lm	27.40 pqrst	Roza رزا	available
4.877 pqrst	21.78 hij	18.48 yz	Jely جلی	water
3.918 mnopqr	22.17 efg	20.02 xy	Serga شرگا	
4.467 tu	22.11 fgh	16.08 z	Arsenal آرسنال	
3.565qrst	21.05 lm	18.33 yz	Babylon بابیلون	
7.056 u	20.98 lmn	14.63 z	Rilana ریلانا	

در هر ستون، میانگین‌های با حروف مشابه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی داری باهم ندارند.

In each column, means with the same letter are not significantly different from each other based on the LSD test at the 5% probability level.

می‌دهد که انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل و مدیریت دقیق آبیاری می‌تواند ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، عملکرد و کیفیت سیب‌زمینی را حفظ کند. استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ترکیب آن با شاخص‌های تحمل به خشکی (DTI) در مطالعات مربوط به تنش خشکی به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (۹). سیب‌زمینی تحت خشکی واکنش‌های متعددی نشان می‌دهد، از جمله کاهش فتوسنتز، بسته شدن روزنه‌ها و تغییر در توزیع مواد. ارقام مقاوم‌تر توانستند افزایش WUE و کاهش شدید در نرخ‌های فتوسنتزی و تعرق را حفظ کنند، که منجر به کاهش افت عملکرد کمتر نسبت به ارقام حساس شد (۱۰).

براساس DTI و تحلیل PCA صفات زراعی، ژنوتیپ‌های Eurostarch و G1043 بیشترین DTI را در شرایط نرمال، تحت تنش ملایم و شدید نشان دادند و به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل و پایدار شناسایی شدند. این ژنوتیپ‌ها توانستند عملکرد غده، تجمع ماده خشک و کارایی مصرف آب را حفظ کنند. در مقابل، ژنوتیپ‌های Arsenal و Babilon کمترین مقدار DTI را داشتند و به دلیل کاهش عملکرد و ماده خشک حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها به تنش کم‌آبی محسوب شدند. ژنوتیپ‌های Roza و Javid نیز تحمل بالایی در شرایط تنش شدید کم‌آبی نشان دادند. افزایش شدت تنش موجب شد نقش صفاتی مانند WUE و حفظ عملکرد غده در تمایز ژنوتیپ‌های متحمل و حساس برجسته‌تر شود (جدول ۷). این نتایج نشان

جدول ۷- مقادیر DTI براساس صفات زراعی در ارقام سیب‌زمینی در شرایط نرمال، تنش ملایم و شدید

Table 7. DTI values based on agronomic traits in potato cultivars under normal, mild and severe stress conditions

Cultivars	DTI (Normal)	Normal interpretation	DTI (Mild tension)	Mild tension interpretation	DTI (Severetension)	Interpretation of severe tension
Eurostarch	1.05	Tolerant	1.20	Tolerant	1.22	Tolerant
G1043	0.95	Semi tolerant	1.15	Tolerant	1.19	Tolerant
Roza	0.70	Semi tolerant	0.90	Semi tolerant	0.93	Semitolerant
Javid	0.60	Semi tolerant	0.85	Semi tolerant	0.84	Semi tolerant
Atusa	0.20	Fairly tolerant	0.35	Fairly tolerant	0.34	Fairly tolerant
Takta	0.15	Fairly tolerant	0.25	Fairly tolerant	0.25	Fairly tolerant
Larisa	0.12	Fairly tolerant	0.24	Fairly tolerant	0.24	Fairly tolerant
Agria	0.15	Fairly tolerant	0.21	Fairly tolerant	0.21	Fairly tolerant
Savalan	0.05	Fairly tolerant	0.11	Fairly tolerant	0.11	Fairly tolerant
Rona	-0.20	Sensitive	-0.27	Sensitive	-0.27	Sensitive
Princess	-0.30	Sensitive	-0.38	Sensitive	-0.38	Sensitive
Jelly	-0.40	Sensitive	-0.50	Sensitive	-0.50	Sensitive
Sherga	-0.45	Sensitive	-0.64	Sensitive	-0.64	Sensitive
Rilana	-0.75	Sensitive	-0.87	Sensitive	-0.87	Sensitive
Babilon	-1.20	Very sensitive	-1.29	Very sensitive	-1.29	Very sensitive
Arsenal	-1.30	Very sensitive	-1.37	Very sensitive	-1.37	Very sensitive

Tolerant: $DTI > 1$

Semi tolerant: $0.5 \leq DTI \leq 1$ نیمه متحمل

Fairly tolerant: $0 \leq DTI \leq 0.5$ نسبتاً متحمل

Sensitive: $DTI < 0.5$ -حساس

Very sensitive: $DTI < -0.5$ بسیار حساس

کاهش یافت. با این حال، ژنوتیپ‌های G1043 (DTI=1.64) و Eurostarch (DTI=1.61) همچنان مقادیر DTI بالاتر از یک را حفظ کردند که بیانگر پاسخ مطلوب‌تر آنها به تنش کم‌آبی و پایداری نسبی صفات زراعی و شاخص‌های رشد در شرایط محدودیت آب است. در مقابل، ژنوتیپ‌های Rilana (DTI=0.48) و Agria (DTI=0.65) به دلیل کسب مقادیر پایین‌تر شاخص DTI، به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس‌تر به کم‌آبی شناسایی شدند (جدول ۸)؛ موضوعی که با کاهش بیشتر عملکرد غده و افت شاخص‌های رشد در شرایط تنش همخوانی داشت. این یافته‌ها با مطالعات بلوم (۲۰۱۱) همخوانی دارد که کاهش عملکرد تحت تنش ملایم، شاخص مهمی برای تعیین توانایی تحمل خشکی محسوب می‌شود (۳). همچنین احمدی و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که برخی ارقام سیب‌زمینی می‌توانند حتی تحت تنش

براساس شاخص‌های رشد، در شرایط نرمال، بیشترین DTI مربوط به ارقام G1043 (۱/۸۲)، Eurostarch (۱/۹۲)، Roza (۱/۵۹)، Takta (۱/۲۴)، Javid (۱/۶۱)، Savalan (۱/۱۶) و Atosa (۱/۲۵) بودند که نشان‌دهنده عملکرد بالاتر از میانگین ارقام مورد آزمایش است. ارقام Agria (۰/۹۹) و Larisa (۰/۸۵) دارای DTI پایین‌تر از میانگین بودند، نشان‌دهنده عملکرد کمتر نسبت به سایر ارقام است (جدول ۸). این نتایج با یافته‌های فیشر و مورر (۱۹۷۸) مطابقت دارد که عملکرد پایه ارقام در شرایط مطلوب، شاخص مناسبی برای مقایسه ظرفیت عملکرد غده‌ای فراهم می‌کند (۲۶). همچنین مطالعات فاروق و همکاران (۲۰۰۹) نشان می‌دهند که عملکرد پایه در شرایط آبیاری کامل، به‌عنوان مرجع برای ارزیابی تحمل تنش به کار می‌رود (۴). با اعمال تنش آبی ملایم، مقدار شاخص DTI در بیشتر ژنوتیپ‌ها

کم عملکرد قابل قبول داشته باشند، که با نتایج تحقیق ما مطابقت دارد (۲۷).

تنش شدید اثر قابل توجهی بر عملکرد ارقام داشت. DTI ارقام G1043 (۱/۳۰) و Eurostarch (۱/۳۴) هنوز نسبتاً بالا باقی ماند، نشان‌دهنده تحمل خوب این ارقام حتی در شرایط خشکی شدید. اما ارقام Agria (۰/۴۱)، Jelly (۰/۳۲) و Arsenal (۰/۳۸) بسیار پایینی داشتند که حاکی از حساسیت شدید به خشکی است (جدول ۵). این نتایج با مطالعات بلوم (۲۰۱۱) و فاروق و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد که ارقام متحمل به خشکی، توانایی حفظ عملکرد حتی تحت تنش شدید را دارند، در حالی که ارقام حساس، کاهش شدید عملکرد را تجربه می‌کنند. این یافته‌ها اهمیت انتخاب ارقام متحمل برای مناطق خشک و مدیریت بهینه آب را نشان می‌دهد (۳ و ۴). ارقام G1043 (۱/۳۰) و Eurostarch (۱/۳۴) عملکرد بالاتر و تحمل خشکی خوبی در سطوح مختلف تنش نشان دادند و گزینه مناسبی برای مناطق با محدودیت آبی هستند. ارقام Agria، Jelly و Arsenal حساسیت بالایی دارند و نیاز به آبیاری منظم دارند تا کاهش عملکرد نداشته باشند. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص ترکیبی DTI، که از تلفیق صفات زراعی و شاخص‌های رشد (AGR، LAI، RGR، CGR) و LAD بدست آمد، نسبت به ارزیابی هر یک از این صفات به تنهایی، توانایی بیشتری در تبیین تفاوت ژنوتیپ‌ها از نظر تحمل به کم‌آبی و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر دارد.

در شرایط آبیاری نرمال، شاخص LAR در تمامی ارقام از ۳۰ تا ۶۰ روز پس از کاشت افزایش یافته و سپس تا ۹۰ روز کاهش یافت که بیانگر توسعه سریع سطح برگ در مراحل اولیه و کاهش سهم برگ‌ها با آغاز رشد سریع غده‌ها است. بیشترین مقدار LAR در رقم Rona مشاهده شد. ارقام Rona، Jelly و

Roza در طول فصل مقادیر بالاتری از LAR را حفظ کردند، در حالی که Arsenal، Rilana و Atusa کمترین مقادیر را داشتند. در تنش ملایم و شدید، همین روند حفظ شد اما مقدار LAR در اکثر ارقام کاهش یافت. با افزایش شدت تنش، افت LAR بیشتر شد و تنها ارقام Agria، Jelly و Savalan توانستند مقادیر نسبتاً بالاتری را حفظ کنند که نشان‌دهنده تحمل بهتر آنها به کم‌آبی است (شکل‌های ۱، ۲ و ۳).

شاخص CGR در هر سه سطح آبیاری تا اواسط فصل افزایش و سپس کاهش یافت. بیشترین مقدار CGR در شرایط نرمال مربوط به ارقام Jelly، Rona و Takta بود. اعمال تنش کم‌آبی موجب کاهش محسوس CGR شد، اما ارقام Roza، Takta، Jelly و Atusa G1043 توانستند در شرایط تنش نیز مقادیر نسبتاً بالاتری را حفظ کنند که بیانگر ظرفیت بیشتر تولید ماده خشک و حفظ فعالیت فتوسنتزی است (شکل‌های ۴، ۵ و ۶).

روند تغییرات LAI نیز مشابه CGR بود؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار آن در حدود ۷۵ روز پس از کاشت مشاهده شد و سپس به دلیل پیری برگ‌ها کاهش یافت. در شرایط نرمال، ارقام Savalan، Jelly و Takta بیشترین LAI را داشتند، در حالی که در تنش شدید، تنها Jelly، Takta و Agria توانستند شاخص سطح برگ نسبتاً بالایی حفظ کنند (شکل‌های ۷، ۸ و ۹). شاخص AGR در تمام تیمارهای آبیاری تا حدود ۶۰ روز پس از کاشت افزایش یافت و سپس کاهش نشان داد. بیشترین مقادیر AGR در شرایط نرمال متعلق به Roza، Takta، Agria، Javid و G1043 بود. با افزایش شدت تنش، مقدار AGR در تمامی ارقام کاهش یافت، اما ارقام متحمل همچنان نرخ رشد

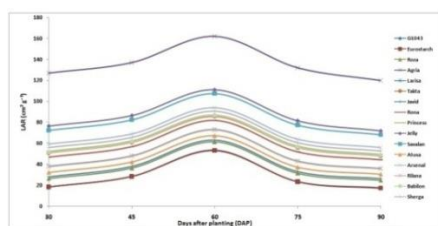
بیشتری نسبت به سایر ارقام حفظ کردند (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲).

شاخص LAD نیز در شرایط نرمال تا حدود ۷۵ روز پس از کاشت افزایش یافت. بیشترین مقادیر این شاخص در ارقام Roza, Jelly, Larisa, Javid و Atusa مشاهده شد، در حالی که Rilana و Arsenal کمترین مقادیر را داشتند. در شرایط تنش، کاهش LAD در تمامی ارقام مشاهده شد، اما ارقام Roza, Jelly, Princess, Javid و Rona دوام سطح برگ بیشتری حفظ کردند که نشان‌دهنده حفظ بهتر ظرفیت فتوسنتزی در شرایط کم آبی است (شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵).

در هر سه سطح آبیاری، RGR با افزایش سن گیاه روند کاهشی داشت. در شرایط نرمال، رقم G1043 بیشترین RGR را در مراحل اولیه رشد نشان داد و پس از آن ارقام Savalan, Larisa, Eurostarch و Javid قرار گرفتند. تنش ملایم موجب کاهش حدود ۱۰ تا ۲۰ درصدی RGR شد، اما G1043 و Savalan همچنان مقادیر بالاتری حفظ کردند. در تنش شدید، کاهش RGR در تمامی ارقام تشدید شد و تنها G1043، Eurostarch و Roza توانستند رشد نسبی

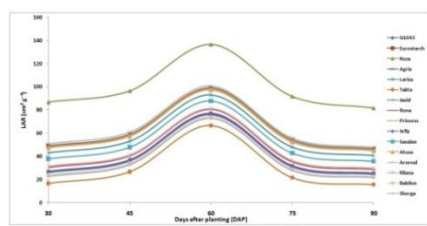
بیشتری نسبت به سایر ارقام حفظ کنند (شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸).

شاخص NAR نیز در شرایط نرمال در مراحل اولیه رشد به بیشترین مقدار رسید و سپس با افزایش سن گیاه کاهش یافت. ارقام Roza, Larisa و G1043 بیشترین NAR را نشان دادند. تنش ملایم باعث کاهش محدود NAR شد، در حالی که در تنش شدید افت این شاخص بسیار محسوس بود و در مراحل پایانی رشد به مقادیر نزدیک صفر رسید. با این حال، Larisa و G1043 در ابتدای دوره تنش شدید کارایی فتوسنتزی بیشتری نسبت به سایر ارقام حفظ کردند. به‌طور کلی، افزایش شدت تنش کم آبی موجب کاهش تمامی شاخص‌های رشد شامل LAR، LAI، CGR، AGR، LAD، RGR و NAR شد. در میان ارقام مورد مطالعه، G1043، Jelly، Roza، Takta، Larisa و Agria توانستند بخش بیشتری از شاخص‌های رشد خود را تحت تنش حفظ کنند و به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل‌تر به کم آبی شناخته شدند، در حالی که Babilon، Rilana، Arsenal و Sherga حساسیت بیشتری به تنش آبی نشان دادند (شکل‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱).



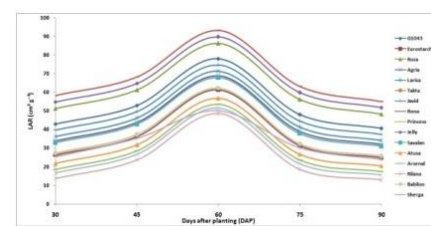
شکل ۳- نسبت سطح برگ به وزن خشک (LAR) ارقام سیب‌زمینی در شرایط تنش کم آبی شدید

Fig 3. Leaf Area Ratio (LAR) of Potato Genotypes under Severe Water Stress



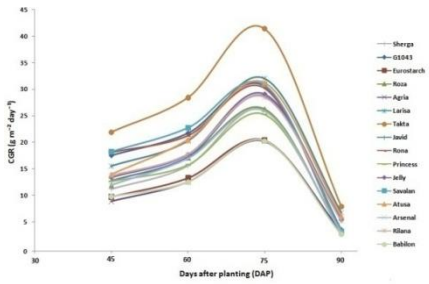
شکل ۲- نسبت سطح برگ به وزن خشک (LAR) ارقام سیب‌زمینی در شرایط تنش کم آبی ملایم

Fig 2. Leaf Area Ratio (LAR) of Potato Genotypes under Mild Water Stress

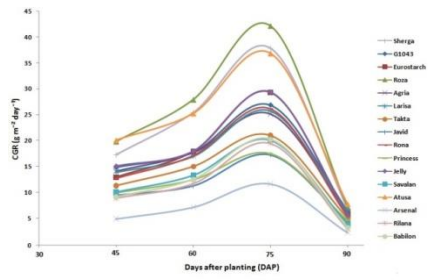


شکل ۱- نسبت تغییرات سطح برگ به وزن خشک (LAR) ارقام سیب‌زمینی در شرایط آبیاری نرمال

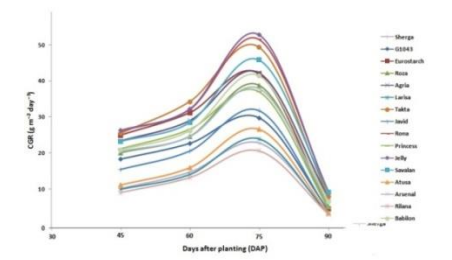
Fig 1. Changes in Leaf Area Ratio (LAR) of Potato Genotypes under Normal Irrigation



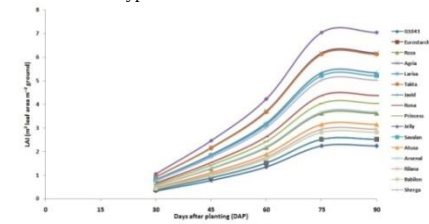
شکل ۶- تغییرات نرخ رشد کل (CGR) ارقام سیب‌زمینی تحت تنش شدید
Fig 6. Changes in Crop Growth Rate (CGR) of Potato Genotypes under Severe Water Stress



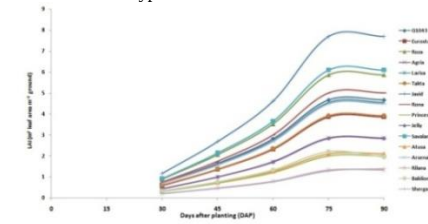
شکل ۵- تغییرات نرخ رشد کل (CGR) ارقام سیب‌زمینی تحت تنش ملایم
Fig 5. Changes in Crop Growth Rate (CGR) of Potato Genotypes under Mild Water Stress



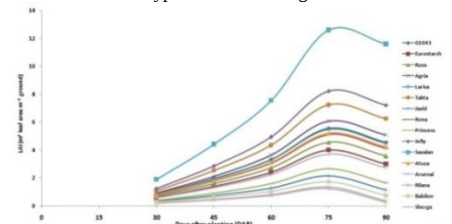
شکل ۴- تغییرات نرخ رشد کل (CGR) ارقام سیب‌زمینی تحت آبیاری کامل
Fig 4. Changes in Crop Growth Rate (CGR) of Potato Genotypes under Full Irrigation



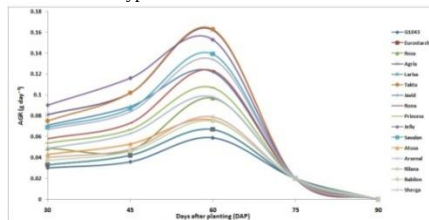
شکل ۹- تغییرات شاخص سطح برگ در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش شدید
Fig 9. Changes in Leaf Area Index (LAI) of Potato Genotypes under Severe Water Stress



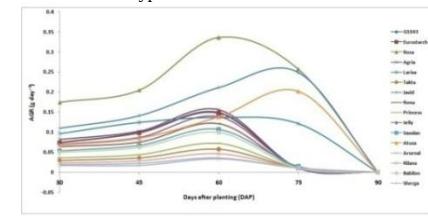
شکل ۸- تغییرات شاخص سطح برگ در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش ملایم
Fig 8. Changes in Leaf Area Index (LAI) of Potato Genotypes under Mild Water Stress



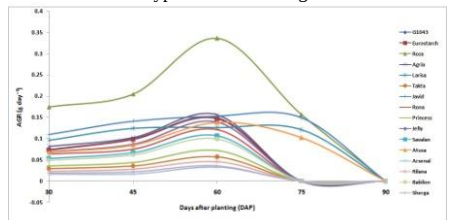
شکل ۷- تغییرات شاخص سطح برگ در ارقام سیب‌زمینی تحت آبیاری کامل
Fig 7. Changes in Leaf Area Index (LAI) of Potato Genotypes under Full Irrigation



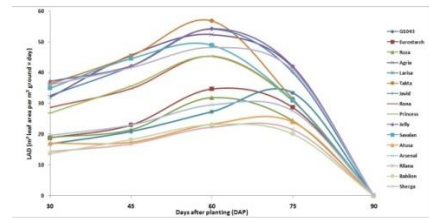
شکل ۱۲- تغییرات شاخص نرخ رشد محصول (AGR) در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش شدید
Fig 12. Changes in Average Growth Rate (AGR) of Potato Genotypes under Severe Water Stress



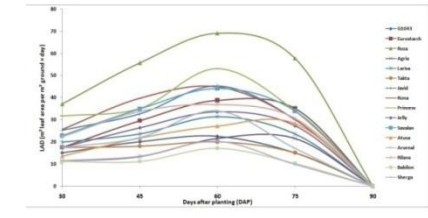
شکل ۱۱- تغییرات شاخص نرخ رشد محصول (AGR) در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش ملایم
Fig 11. Changes in Average Growth Rate (AGR) of Potato Genotypes under Mild Water Stress



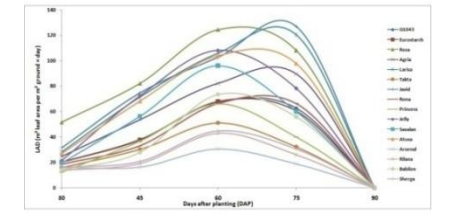
شکل ۱۰- تغییرات شاخص نرخ رشد محصول (AGR) در ارقام سیب‌زمینی تحت آبیاری کامل
Fig 10. Changes in Average Growth Rate (AGR) of Potato Genotypes under Full Irrigation



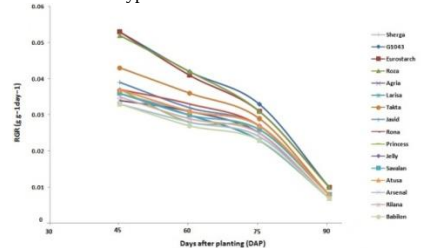
شکل ۱۵- تغییرات دوام سطح برگ در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش شدید
Fig 15. Changes in Leaf Area Duration (LAD) of Potato Genotypes under Severe Water Stress



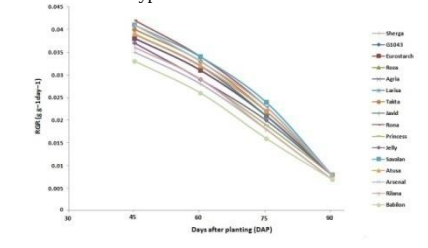
شکل ۱۴- تغییرات دوام سطح برگ در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش ملایم
Fig 14. Changes in Leaf Area Duration (LAD) of Potato Genotypes under Mild Water Stress



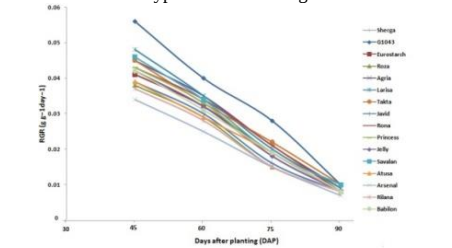
شکل ۱۳- تغییرات دوام سطح برگ در ارقام سیب‌زمینی تحت آبیاری کامل
Fig 13. Changes in Leaf Area Duration (LAD) of Potato Genotypes under Full Irrigation



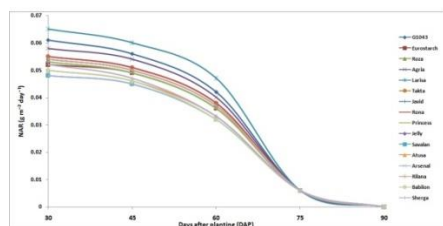
شکل ۱۸- تغییرات نرخ رشد نسبی (RGR) ماده خشک کل در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش شدید
Fig 18. Changes in Relative Growth Rate (RGR) of Total Dry Matter in Potato Genotypes under Severe Water Stress



شکل ۱۷- تغییرات نرخ رشد نسبی (RGR) ماده خشک کل در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش ملایم
Fig 17. Changes in Relative Growth Rate (RGR) of Total Dry Matter in Potato Genotypes under Mild Water Stress

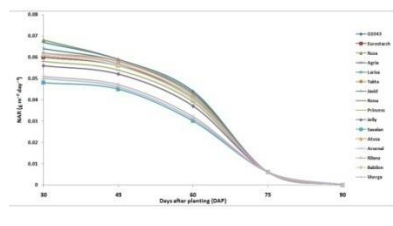


شکل ۱۶- تغییرات نرخ رشد نسبی (RGR) ماده خشک کل در ارقام سیب‌زمینی تحت آبیاری کامل
Figure 16 – Changes in Relative Growth Rate (RGR) of Total Dry Matter in Potato Genotypes under Full Irrigation



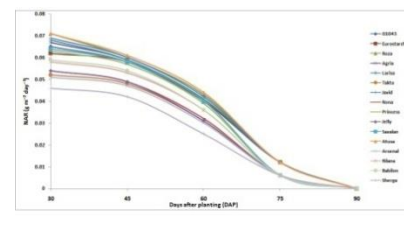
شکل ۲۱- تغییرات نرخ رشد نسبی غده (RGR) در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش شدید

Fig 21. Changes in Relative Growth Rate (RGR) of Tuber in Potato Genotypes under Severe Water Stress



شکل ۲۰- تغییرات نرخ رشد نسبی (RGR) در ارقام سیب‌زمینی تحت تنش ملایم

Fig 20. Changes in Relative Growth Rate (RGR) of Potato Genotypes under Mild Water Stress



شکل ۱۹- تغییرات نرخ رشد نسبی غده (RGR) در ارقام سیب‌زمینی تحت آبیاری کامل

Fig 19. Changes in Relative Growth Rate (RGR) of Tuber in Potato Genotypes under Full Irrigation

جدول ۹- مقادیر DTI، براساس شاخص‌های رشد در ارقام سیب‌زمینی در شرایط نرمال، تنش ملایم و شدید

Table 9. DTI values, based on growth indices in potato cultivars under normal, mild and severe stress conditions

Cultivars	Yield (Normal)	DTI (Normal)	Normal interpretation	Yield (Mild tension)	DTI (Mild tension)	Mild tension interpretation	Yield (severe tension)	DTI (Severetension)	Interpretation of severe tension
G1043	46.82	1.82	Tolerant	42.13	1.64	Tolerant	33.27	1.30	Tolerant
Eurostarch	47.9	1.91	Tolerant	40.49	1.61	Tolerant	33.60	1.34	Tolerant
Roza	43.74	1.59	Tolerant	32.29	0.85	Semi tolerant	27.40	0.66	Semi tolerant
Agria	34.6	0.99	Semi tolerant	27.64	0.65	Semi tolerant	21.85	0.41	Fairly tolerant
Larisa	32	0.85	Semi tolerant	28.90	0.70	Semi tolerant	24.70	0.51	Semi tolerant
Takta	38.59	1.24	Tolerant	33.01	0.89	Semi tolerant	25.47	0.54	Semi tolerant
Javid	43.89	1.61	Tolerant	37.60	1.10	Tolerant	30.30	0.76	Semi tolerant
Rona	31.02	0.80	Semi tolerant	33.04	0.91	Semi tolerant	25.20	0.72	Semi tolerant
Princess	32.7	0.89	Semi tolerant	28.25	0.67	Semi tolerant	21.37	0.57	Semi tolerant
Jelly	30.77	0.79	Semi tolerant	21.59	0.47	Fairly tolerant	18.48	0.32	Fairly tolerant
Savalan	37.29	1.16	Tolerant	34.05	0.96	Semi tolerant	28.96	0.70	Semi tolerant
Atosa	38.8	1.25	Tolerant	34.43	0.96	Semi tolerant	29.88	0.74	Semi tolerant
Arsenal	27.9	0.65	Semi tolerant	23.79	0.47	Fairly tolerant	16.08	0.38	Fairly tolerant
Rilana	28.02	0.65	Semi tolerant	24.28	0.48	Fairly tolerant	14.63	0.36	Fairly tolerant
Babilon	29.05	0.70	Semi tolerant	24.76	0.51	Semi tolerant	18.33	0.47	Fairly tolerant
Sherga	31.28	0.82	Semi tolerant	23.53	0.49	Fairly tolerant	20.02	0.50	Semi tolerant

DTI > 1: Tolerant
 0.5 ≤ DTI ≤ 1: Semi tolerant
 0 ≤ DTI ≤ 0.5: Fairly tolerant
 DTI < -0.5: Very sensitive
 -0.5 ≤ DTI ≤ 0: حساس

DTI > 1: متحمل
 0.5 ≤ DTI ≤ 1: نیمه متحمل
 0 ≤ DTI ≤ 0.5: نسبتاً متحمل

شدید)، الگوی پاسخ ژنوتیپ‌ها پایدار بوده و ارقام متحمل توانستند مقادیر بالاتری از DTI نهایی را حفظ کنند. در شرایط آبیاری نرمال، ارقام Eurostarch و G1043 بالاترین مقادیر DTI نهایی را به خود اختصاص دادند و در گروه ژنوتیپ‌های متحمل قرار

براساس جدول نهایی DTI که با ترکیب صفات زراعی و شاخص‌های رشد محاسبه شد، اختلاف قابل توجهی بین ارقام سیب‌زمینی از نظر تحمل به تنش کم‌آبی در هر سه سطح آبیاری مشاهده گردید (جدول ۱۰). در هر سه سطح آبیاری (نرمال، تنش ملایم و تنش

بیانگر توانایی بالای آنها در تنظیم رشد، تخصیص ماده خشک و حفظ عملکرد غده‌ای تحت تنش شدید است. در مقابل، ارقام Babilon، Arsenal و Sherga کمترین مقادیر DTI نهایی را در هر سه سطح تنش نشان دادند و به عنوان ژنوتیپ‌های حساس به خشکی شناسایی شدند (جدول ۱۰). به طور کلی، همگرایی نتایج صفات زراعی و شاخص‌های رشد در DTI نهایی نشان داد که ژنوتیپ‌های متحمل با حفظ پویایی رشد، توسعه تاج گیاهی و کارایی مصرف آب، قادر به کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر عملکرد غده‌ای هستند. این نتایج بیانگر کارایی شاخص DTI ترکیبی به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای شناسایی و طبقه‌بندی ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی متحمل به تنش خشکی و انتخاب ارقام مناسب برای شرایط کم‌آبی است

گرفتند. این ارقام توانستند هم از نظر شاخص‌های رشد و هم صفات زراعی، عملکرد بالاتری نسبت به سایر ارقام نشان دهند. ارقام Agria و Javid در این شرایط در گروه متحمل تا نیمه‌متحمل قرار گرفتند و توانستند شاخص‌های رشد و صفات زراعی مطلوبی را حفظ کنند. در شرایط تنش ملایم، اگرچه مقدار DTI نهایی در همه ارقام کاهش یافت، اما همچنان Eurostarch و G1043 در رتبه‌های برتر باقی ماندند که نشان‌دهنده ثبات فیزیولوژیک و توانایی حفظ توسعه تاج گیاهی تحت محدودیت آب است. ارقام Javid، Roza و Savalan کاهش متوسطی را تجربه کردند و در گروه ژنوتیپ‌های با تحمل نسبی به تنش قرار گرفتند. در شرایط تنش شدید، افت DTI نهایی در تمامی ارقام مشهود بود، اما ارقام Eurostarch و G1043 همچنان بالاترین مقادیر را حفظ کردند که

جدول ۱۰- مقادیر DTI نهایی، براساس صفات زراعی و شاخص‌های رشد در ارقام سیب‌زمینی در شرایط نرمال، تنش ملایم و شدید

Table 10. Final DTI values, based on agronomic traits and growth indices in potato cultivars under normal, mild and severe stress conditions

Cultivars	Yield (Normal)	DTI (Normal)	Normal interpretation	Yield (Mild tension)	DTI (Mild tension)	Mild tension interpretation	Yield (severe tension)	DTI (Mild tension)	Interpretation of severe tension
G1043	46.82	1.63	Tolerant	42.13	1.45	Tolerant	33.27	1.29	Tolerant
Eurostarch	47.9	1.57	Tolerant	40.49	1.45	Tolerant	33.60	1.16	Tolerant
Roza	43.74	1.30	Tolerant	32.29	1.02	Tolerant	27.40	0.70	Semi tolerant
Agria	34.6	1.33	Tolerant	27.64	0.87	Semi tolerant	21.85	0.67	Semi tolerant
Larisa	32	0.89	Semi tolerant	28.90	0.62	Semi tolerant	24.70	0.56	Semi tolerant
Takta	38.59	0.86	Semi tolerant	33.01	0.72	Semi tolerant	25.47	0.52	Semi tolerant
Javid	43.89	0.74	Semi tolerant	37.60	0.63	Semi tolerant	30.30	0.38	Fairly tolerant
Rona	31.02	0.68	Semi tolerant	33.04	0.51	Semi tolerant	25.20	0.31	Fairly tolerant
Princess	32.7	0.61	Semi tolerant	28.25	0.51	Semi tolerant	21.37	0.36	Fairly tolerant
Jelly	30.77	0.37	Fairly tolerant	21.59	0.44	Fairly tolerant	18.48	0.35	Fairly tolerant
Savalan	37.29	0.38	Fairly tolerant	34.05	0.45	Fairly tolerant	28.96	0.40	Fairly tolerant
Atosa	38.8	0.31	Fairly tolerant	34.43	0.08	Fairly tolerant	29.88	0.22	Fairly tolerant
Arsenal	27.9	0.24	Fairly tolerant	23.79	0.10	Fairly tolerant	16.08	0.03	Fairly tolerant
Rilana	28.02	-0.04	Sensitive	24.28	-0.04	Sensitive	14.63	-0.05	Sensitive
Babilon	29.05	-0.08	Sensitive	24.76	-0.19	Sensitive	18.33	-0.14	Sensitive
Sherga	31.28	-0.16	Sensitive	23.53	-0.33	Sensitive	20.02	-0.25	Sensitive

Sensitive: $DTI < 0$: 0.5 ≤ DTI < 0.5 حساس
Very sensitive: $DTI < -0.5$ بسیار حساس

Tolerant: $DTI > 1$ متحمل
Semi tolerant: $0.5 \leq DTI \leq 1$ نیمه متحمل
Fairly tolerant: $0 \leq DTI \leq 0.5$ نسبتاً متحمل

ژنوتیپ‌های Eurostarch و G1043 در تمام سطوح آبیاری نشان می‌دهد که این ارقام دارای مکانیسم‌های فیزیولوژیک مؤثر برای مقابله با تنش خشکی هستند. حفظ مقادیر بالاتر DTI نهایی در این ژنوتیپ‌ها احتمالاً ناشی از پایداری شاخص‌های رشد LAI، CGR و LAD و همچنین تخصیص مؤثر ماده خشک به غده‌ها تحت شرایط کم‌آبیاری است (۲۸). ژنوتیپ‌هایی مانند Arsenal و Babilon که در هر یک از شاخص‌ها ضعیف بودند، در ترکیب شاخص‌ها نیز به عنوان ژنوتیپ‌های حساس طبقه‌بندی شدند.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که ژنوتیپ‌های متحمل قادرند با حفظ توسعه تاج گیاهی و تداوم فتوسنتز، کاهش عملکرد را در شرایط تنش به حداقل برسانند (۲۹). کاهش تدریجی DTI نهایی با افزایش شدت تنش آبی بیانگر آن است که پاسخ سیب‌زمینی به خشکی وابسته به شدت تنش و مرحله رشد است (۱۶).

در تنش ملایم، بسیاری از ژنوتیپ‌ها توانستند بخشی از پویایی رشد خود را حفظ کنند، در حالی که در تنش شدید، اختلال در رشد تاج، کاهش سطح برگ فعال و محدودیت انتقال مواد فتوسنتزی به غده‌ها منجر به کاهش شدید DTI شد (۱۳ و ۲۹).

نتایج همچنین نشان می‌دهد که همگرایی صفات زراعی و شاخص‌های رشد در DTI نهایی، ارزیابی دقیق‌تری از تحمل خشکی نسبت به تکیه صرف بر عملکرد ارائه می‌دهد (۲۷ و ۲۹). ژنوتیپ‌هایی Babilon، Arsenal و Sherga که عملکرد ضعیفی در هر دو گروه صفات زراعی و شاخص‌های رشد داشتند، در DTI نهایی نیز به عنوان ژنوتیپ‌های حساس طبقه‌بندی شدند. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن پویایی رشد و پاسخ‌های فیزیولوژیک در کنار صفات نهایی عملکرد را تأکید می‌کند (۳ و ۱۶). شارما و سینگ (۲۰۲۰) نتیجه گرفتند ترکیب DTI با

صفات فیزیولوژیک (مانند میزان ریشه‌های عمیق‌تر و میزان انتقال آب)، دقت انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در سیب‌زمینی را به ۸۹ درصد افزایش می‌دهد. همچنین توصیه کردند در برنامه‌های اصلاحی سیب‌زمینی متحمل به خشکی، رویکرد چندصفتی با ترکیب DTI و صفات فیزیولوژیک استفاده شود تا ژنوتیپ‌هایی با تحمل به خشکی بهینه‌تر شناسایی شوند. ایشان توصیه کردند این روش برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل، برنامه‌ریزی آبیاری، و مدیریت تنش خشکی در سیب‌زمینی کاربرد دارد (۳۰). محققان متعددی گزارش کرده‌اند که DTI به عنوان یک ابزار مبتنی بر صفات فیزیولوژیک، عملکرد، کارایی مصرف آب، شاخص‌های رشد، می‌تواند به صورت دقیق‌تری انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی را بهینه‌تر شناسایی کند. ایشان توصیه کردند DTI به عنوان ابزار قابل اعتمادی برای برنامه‌های اصلاحی سیب‌زمینی متحمل به خشکی استفاده شود. همچنین اعلام کردند این روش برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل، برنامه‌ریزی آبیاری، و مدیریت تنش خشکی در سیب‌زمینی کاربرد دارد (۲۹، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴ و ۳۵).

نتیجه‌گیری کلی

خشکسالی یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی در جهان است که می‌تواند موجب کاهش عملکرد محصولات و بروز خسارات اقتصادی قابل توجه شود. ارزیابی تحمل گیاهان به خشکی از طریق تحلیل عملکرد و شاخص‌های رشد و تلفیق آنها در شاخص تحمل به خشکی (DTI)، رویکردی مؤثر برای شناسایی و توسعه ژنوتیپ‌های متحمل‌تر سیب‌زمینی محسوب می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که کم‌آبیاری تأثیر معنی‌داری بر پویایی رشد، توسعه تاج گیاهی و عملکرد غده‌ای سیب‌زمینی دارد و شدت این

مدیریت آبیاری در مناطق با محدودیت منابع آب فراهم آورد و نقش مهمی در افزایش پایداری تولید سیب‌زمینی ایفاء کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پروژه ۰۳-۰۱۲-۰۳۰۱۷۷-۳۷-۴ موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر می‌باشد. بدین‌وسیله از مسئولین محترم موسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل که امکان انجام این پژوهش را فراهم نمودند، کمال تشکر را دارم.

اثر به ژنوتیپ و سطح تنش آبی وابسته است. شاخص DTI نهایی که براساس ترکیب صفات زراعی و شاخص‌های رشد محاسبه شد، ابزار قابل اعتمادی برای تفکیک ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به تنش خشکی بود. ژنوتیپ‌های Eurostarch و G1043 در تمامی سطوح آبیاری بالاترین مقادیر DTI را حفظ کرده و به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی انتخاب شدند، در حالی که ژنوتیپ‌های Babilon، Arsenal و Sherga حساس‌ترین واکنش را نشان دادند. به‌طور کلی، ترکیب شاخص‌های رشد با شاخص تحمل تنش (DTI) می‌تواند چارچوبی مؤثر برای انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب و بهینه‌سازی

References

1. Salehi-Soghadi, Z., Islam, M. S., Manschadi, A. M., & Kaul, H. P. (2023). Transpiration efficiency of some potato genotypes under drought. *Agronomy*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy13040996>
2. Shoukat, S., & Tufail, A. (2025). Drought stress management in potatoes: Physiological, biochemical, and agronomic strategies. *Applied Agriculture Sciences Review*, 3(1), 1–8. <https://doi.org/10.25163/agriculture.3110053>
3. Blum, A. (2011). Drought resistance – Is it really a complex trait? *Functional Plant Biology*, 38(10), 753–757. <https://doi.org/10.1071/FP11101>
4. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
5. Nasir, M., & Tóth, G. (2022). Physiological and morphological traits as predictors of drought tolerance in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Plant Physiology*, 272, 153894. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153894>
6. Niu, Z., Zhang, Y., Li, M., Wang, J., & Zhao, X. (2024). Deficit irrigation as an effective way to increase potato water use efficiency: A meta-analysis. *Agronomy*, 14(7), 1533. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071533>
7. Zhang, H., Liu, X., Wang, Y., Li, J., & Chen, F. (2024). Dry matter accumulation, water productivity and quality of potato in response to regulated deficit irrigation. *Plants*, 13(14), 1927. <https://doi.org/10.3390/plants13141927>
8. Shi, X., Jia, L., Yang, H., Wu, L., Qin, Y., & Fan, M. (2021). Determination of suitable deficit irrigation stage in potato production. *Journal of Plant Sciences*, 9(5), 262–271. <https://doi.org/10.3923/jps.2021.262.271>
9. Li, X., Luo, L., Shi, X., Li, S., Wang, L., Li, D., & Li, F. (2025). Screening drought tolerance in potato germplasm resources in the northwestern region of China. *BMC Plant Biology*, 25, 777. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06716-2>
10. Gervais, S., Nair, R., & Prasad, P. (2021). Potato response to drought stress: Physiological and growth basis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 698060. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.698060>
11. Gardner, F. P., Pearce, R. B., & Mitchell, R. L. (1985). *Physiology of crop plants* (pp. 31–36). Iowa State University Press.

12. Hill, D., Koryzis, A., Nelson, D., Hammond, J., & Bell, L. (2024). Investigating the utility of potato (*Solanum tuberosum* L.) canopy temperature and leaf greenness responses to water restriction for the improvement of irrigation management. *Agricultural Water Management*, 303, 109063. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109063>
13. Rai, A., & Dong, Y. (2025). A scoping review of irrigation scheduling methods in potato (*Solanum tuberosum* L.) production. *American Journal of Potato Research*, 102, 348–371. <https://doi.org/10.1007/s12230-025-09997-3>
14. Ma, Y. Z., Pan, N., Su, W., Zhang, F. J., Ye, G. J., Pu, X. Q., Zhou, Y., & Wang, J. (2024). Soil water stress effects on potato tuber starch quality formation. *European Potato Journal*, 67, 1829–1848. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09720-5>
15. Flexas, J., & Medrano, H. (2002). The response of photosynthesis to water stress: From leaf to whole plant. *Annual Review of Plant Biology*, 53, 221–248. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.53.081601.173250>
16. Monneveux, P., Ramírez, D. A., & Pino, M. T. (2013). Drought tolerance in potato (*Solanum tuberosum* L.): Can we learn from drought tolerance research in cereals? *Plant Science*, 205–206, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.01.011>
17. Ramírez, D. A., Rolando, J. L., Yactayo, W., Monneveux, P., Mares, V., & Quiroz, R. (2015). Improving potato drought tolerance through the induction of long-term water stress memory. *Plant Science*, 238, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.05.016>
18. Gervais, T., Creelman, A., Li, X.-Q., Bizimungu, B., De Koeyer, D., & Dahal, K. (2021). Potato response to drought stress: Physiological and growth basis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 698060. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.698060>
19. Hill, D., Nelson, D., Hammond, J., Bell, L., et al. (2021). Morphophysiology of Potato (*Solanum tuberosum*) in Response to Drought Stress: Paving the Way Forward. *Frontiers in Plant Science*, 11, 597554. DOI: 10.3389/fpls.2020.597554
20. Nasir, M. W., & Tóth, Z. (2022). Effect of drought stress on potato production: A review. *Agronomy*, 12(3), 635. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030635>
21. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations
22. Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate Data Analysis* (7th ed.). Pearson Education Limited. ISBN: 978-0138132637
23. Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis* (6th ed.). Pearson Prentice Hall. ISBN: 978-0131877153
24. Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal Component Analysis. *WIREs Computational Statistics*, 2(4), 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
25. Krishnamurthy, L., Vadez, V., Jyotsna Devi, J. M., Serraj, R., Nigam, S. N., Upadhyaya, H. D., & Kashiwagi, J. (2010). Sources of tolerance to terminal drought in the chickpea (*Cicer arietinum* L.) minicore *germplasm*. *Field Crops Research*, 119(2), 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.08.002>
26. Fischer, R. A., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), 897–912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
27. Ahmadi, S. H., Andersen, M. N., Plauborg, F., Poulsen, R. T., Jensen, C. R., Sepaskhah, A. R., & Hansen, S. (2010). Effects of irrigation strategies and soils on field-grown potatoes: Yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1923–1930. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.007>
28. Kashyap, P. S., & Panda, R. K. (2003). Effect of irrigation scheduling on potato crop parameters under water stress. *Agricultural Water Management*, 59, 49–66. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00131-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00131-0)
29. Levy, D., & Veilleux, R. E. (2007). Adaptation of potato to high temperatures and salinity a review. *American Journal of Potato Research*, 84, 487–506. <https://doi.org/10.1007/BF02987885>

30. Sharma, S., & Singh, R. (2020). Water use efficiency in crops under drought stress: A review. *Agricultural Water Management*, 232, 106012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106012>
31. Fernandez, G. C. J. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In *Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress*.
32. Flexas, J., & Medrano, H. (2002a). Drought inhibition of photosynthesis in C3 plants: Stomatal and non-stomatal limitations. *Journal of Experimental Botany*, 53, 2461–2473. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf027>
33. He, Y., Zhang, H., & Li, H. (2025). Studies on the response of water regulation to growth and physiological traits in potato under water deficit. *Global Potato Research Proceedings*, 1(1), 99–117.
34. Huang, J., & Zhang, Y. (2021). Physiological indices for drought tolerance assessment in crops. *Crop Science*, 61(4), 1234–1245. <https://doi.org/10.1002/csc2.20123>
35. Mora-Sanhueza, R., Tighe-Neira, R., López-Olivari, R., & Inostroza-Blancheteau, C. (2025). Assessment of different irrigation thresholds to optimize the water use efficiency and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) under field conditions. *Plants*, 14(11), 1734. <https://doi.org/10.3390/plants14111734>