



Mitigating the effects of water deficit in potato by foliar application of potassium silicate: physiological and functional assessment of three new cultivars

Aliasghar Fozouni¹ | Babak Andalibi² | Mehrdad Chaichi³ | Sajjad Nasiri⁴

1. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: aliasgharfozouni@znu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: andalibi@znu.ac.ir
3. Agricultural Research and Training Center and Natural Resources of Hamedan Province, Hamedan, Iran E-mail: M.chaichi@areeo.ac.ir
4. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: sajjad.nasiri@alumni.znu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 27 July 2025
Received in revised form
22 September 2025
Accepted 8 November 2025
Published online 5 January 2026

Keywords:

Chlorophyll
Drought stress
Osmolytes
Potato physiology

ABSTRACT

Objective: Drought and limited water resources threaten global potato production. This study evaluated the effects of foliar potassium silicate on agronomic performance and physiological traits of three potato cultivars under water-deficit

Methods: The experiment followed a split-split-plot design in a randomized complete-block arrangement with three replications. Irrigation interval (main plot) comprised 7, 10, and 13 days. Foliar treatments (sub-plot) included: (i) control (no spray), (ii) a single spray at 50 days after planting, and (iii) two sprays at 40 and 80 days after planting at 2 L K₂SiO₃ per 1000 L water. Cultivars (sub-sub plot) were Corsica, Sante, and Vog. Measured traits were tuber yield, total chlorophyll, soluble protein, total carbohydrate, proline, and malondialdehyde (MDA) content.

Results: The triple interaction among irrigation interval, foliar treatment, and cultivar significantly affected all traits. The highest tuber yield (44.61 t ha⁻¹) occurred with 7-day irrigation, two foliar sprays, and the Corsica cultivar; the lowest yield (39.60 t ha⁻¹) occurred with 13-day irrigation without foliar spray in Sante. Total chlorophyll was highest under non-stress conditions with two sprays in Corsica (2.26 mg g⁻¹ FW). Proline accumulation peaked in Sante under severe drought (13-day irrigation, no spray) (53.69 μmol g⁻¹ FW). Soluble protein (14.94 mg g⁻¹ DW) and total carbohydrate (21.12 mg g⁻¹ DW) were greatest under 10-day irrigation with two sprays in Corsica. MDA content was lowest with two sprays under 7-day irrigation (3.02 nmol g⁻¹ FW) and highest in Sante under severe drought without spray (25.14 nmol g⁻¹).

Conclusions: In Corsica, two foliar applications of potassium silicate under 7-day irrigation improved physiological performance and water-use efficiency while reducing oxidative stress indicators. Mild drought stress also enhanced accumulation of protective compounds (soluble carbohydrates and proteins) in Corsica. In contrast, Sante under severe drought without foliar application showed the greatest oxidative damage and yield reduction. Overall, combining two potassium silicate foliar applications with selecting drought-tolerant cultivars such as Corsica offers a promising, sustainable approach to maintaining yield, enhancing quality, and optimizing water use in drought-prone regions.

Cite this article: Fozouni, A., Andalibi, B., Chaichi, M., & Nasiri, S. (2026). Mitigating the effects of water deficit in potato by foliar application of potassium silicate: physiological and functional assessment of three new cultivars. *Journal of Crops Improvement*, 27 (4), 695-714. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.399117.2945>





تعدیل اثرات کم آبی در سیب زمینی با محلول پاشی سیلیکات پتاسیم: بررسی فیزیولوژیک و عملکردی سه رقم جدید

علی اصغر فزونی^۱ | بابک عندلیبی^۲ | مهرداد چائی چی^۳ | سجاد نصیری^۴

۱. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: aliasgharfozouni@znu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: andalibi@znu.ac.ir
۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، همدان، ایران. رایانامه: M.chaichi@areeo.ac.ir
۴. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: sajjad.nasiri@alumni.znu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

هدف: با توجه به مشکلات جهانی ناشی از تنش خشکی و محدودیت منابع آبی، این پژوهش با هدف بررسی اثرات سیلیکات پتاسیم بر عملکرد و صفات فیزیولوژیک ارقام جدید سیب زمینی تحت شرایط کم آبی انجام شد. **روش پژوهش:** آزمایش به صورت کرت های دو بار خرد شده در قالب بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عامل اصلی شامل سه فاصله آبیاری (هفت، ۱۰ و ۱۳ روز)، عامل فرعی سه سطح محلول پاشی سیلیکات پتاسیم (آشاده، یک بار در ۵۰ روزگی و دوبار در ۴۰ و ۸۰ روزگی با غلظت ۲ لیتر در هزار لیتر آب) و عامل فرعی تر سه رقم سیب زمینی (کورسیکا، سانه و ووگ) بود. صفات مورد ارزیابی شامل عملکرد غده، کلروفیل کل، پروتئین محلول، کربوهیدرات کل، پرولین و مالون دی آلدئید بودند.

یافته ها: نتایج نشان داد برهم کنش سه گانه تیمارها بر همه صفات معنی دار بود. بیشترین عملکرد غده (۶۱/۴۴ تن در هکتار) در آبیاری هفت روزه، محلول پاشی دوبار و رقم کورسیکا حاصل شد، در حالی که کمترین عملکرد (۶۰/۳۹ تن در هکتار) در آبیاری ۱۳ روزه، بدون محلول پاشی و رقم سانه ثبت گردید. بیشینه کلروفیل کل (۲/۲۶ میلی گرم بر گرم وزن تر) در شرایط بدون تنش، با محلول پاشی دوبار و رقم کورسیکا مشاهده شد. بیشترین پرولین (۶۹/۵۳ میکرومول بر گرم وزن تر) در رقم سانه تحت تنش شدید (آبیاری ۱۳ روزه، بدون محلول پاشی) ثبت گردید. بالاترین پروتئین محلول (۹۴/۱۴ میلی گرم بر گرم وزن خشک) و کربوهیدرات کل (۱۲/۲۱ میلی گرم بر گرم وزن خشک) در آبیاری ۱۰ روزه، محلول پاشی دو بار و رقم کورسیکا به دست آمد. کمترین مالون دی آلدئید (۳/۰۲ نانومول بر گرم وزن تر) در آبیاری هفت روزه با محلول پاشی دوبار ثبت شد، در حالی که بیشترین آن (۱۴/۲۵ نانومول بر گرم وزن تر) در رقم سانه تحت تنش شدید و بدون محلول پاشی دیده شد.

نتیجه گیری: رقم کورسیکا، محلول پاشی دو بار سیلیکات پتاسیم، به ویژه تحت آبیاری هفت روزه، موجب بهبود وضعیت فیزیولوژیک، افزایش کارایی مصرف آب و کاهش شاخص های تنش اکسیداتیو گردید. این امر نشان دهنده نقش مؤثر سیلیکات پتاسیم در بهینه سازی فرایندهای متابولیک و حفظ تعادل فیزیولوژیک گیاه در شرایط کم آبی است. تنش ملایم نیز با تحریک مکانیسم های دفاعی، ترکیبات حفاظتی مانند کربوهیدرات های محلول و پروتئین را در این رقم افزایش داد. در مقابل، رقم سانه تحت تنش شدید بدون محلول پاشی بیشترین آسیب اکسیداتیو و کاهش عملکرد را نشان داد. بنابراین، استفاده از محلول پاشی دو بار سیلیکات پتاسیم همراه با انتخاب ارقام مقاوم مانند کورسیکا می تواند راه کاری مؤثر و پایدار برای حفظ عملکرد، بهبود کیفیت محصول و مدیریت منابع آبی در مناطق مستعد خشکی باشد.

کلیدواژه ها:

ترکیبات اسمزی

تنش خشکی

فیزیولوژی سیب زمینی

کلروفیل

استناد: فزونی، علی اصغر؛ عندلیبی، بابک؛ چائی چی، مهرداد و نصیری، سجاد (۱۴۰۴). تعدیل اثرات کم آبی در سیب زمینی با محلول پاشی سیلیکات پتاسیم: بررسی فیزیولوژیک و عملکردی سه رقم جدید. *به زراعی کشاورزی*، ۲۷ (۴)، ۶۹۵-۷۱۴. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.399117.2945>



۱. مقدمه

تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و تهدیدی جدی برای امنیت غذایی محسوب می‌شود (سلیمان^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). سیب‌زمینی^۲، به‌عنوان چهارمین محصول غذایی مهم جهان، به‌دلیل نیاز بالای خود به آب، به‌شدت از کم‌آبی آسیب می‌بیند، به‌طوری‌که فتوسنتز، تعادل آبی، رشد و عملکرد غده‌ها تحت تأثیر منفی قرار می‌گیرند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). کاهش رطوبت خاک نخستین پیامد این تنش است که دسترسی گیاه به آب را محدود و فرایندهای فیزیولوژیک و فتوسنتزی را مختل می‌سازد (باندروسکا^۳، ۲۰۲۲). در چنین شرایطی، بسته‌شدن روزنه‌ها و تغییرات متابولیکی رخ داده و درنهایت کیفیت و کمیت محصول کاهش می‌یابد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). با این حال، ارقام جدید سیب‌زمینی دارای تفاوت‌های ژنتیکی در مقاومت به خشکی هستند و پاسخ آن‌ها می‌تواند با سنتز ترکیبات سازگارکننده نظیر پرولین و قندهای محلول همراه باشد. از این‌رو، استفاده از راه‌کارهای مدیریتی مانند کاربرد ترکیبات تقویت‌کننده در کاهش اثرات خشکی اهمیت ویژه‌ای دارد (ال‌فکی^۴ و همکاران، ۲۰۲۳). در این میان، سیلیکات‌پتاسیم به‌دلیل دارا بودن سیلیس و پتاسیم، نقشی کلیدی در تقویت ساختار سلولی و افزایش مقاومت گیاه دارد. سیلیس با تقویت دیواره‌های سلولی و کاهش نفوذپذیری غشا، مقاومت گیاه را در برابر خشکی بالا می‌برد (آزاب^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). هم‌چنین، این ترکیب با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از آسیب اکسیداتیو ناشی از تولید گونه‌های فعال اکسیژن جلوگیری می‌کند و پایداری سلولی را ارتقا می‌دهد (سینگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۳؛ ابوسرا^۷ و همکاران، ۲۰۲۳). در نهایت، با توجه به نقش حیاتی سیب‌زمینی در تأمین نشاسته و امنیت غذایی جهانی و هم‌زمان با محدودیت روزافزون منابع آب و تغییرات اقلیمی، توسعه و معرفی ارقام مقاوم همراه با کاربرد ترکیباتی نظیر سیلیکات‌پتاسیم ضرورتی اساسی دارد (باندروسکا، ۲۰۲۲). بر همین اساس، پژوهش حاضر به بررسی اثرات این ترکیب بر ارقام جدید سیب‌زمینی در شرایط کم‌آبی پرداخته است.

۲. پیشینه پژوهش

۲.۱. پیشینه نظری

کم‌آبی وضعیتی موقتی است که طی آن گیاه قادر به تأمین آب موردنیاز خود نیست، درحالی‌که خشکی مزمن به کمبود مداوم آب در دوره‌ای طولانی اطلاق می‌شود و معمولاً در مناطق خشک یا تحت تغییرات اقلیمی شدید رخ می‌دهد (سلیمان و همکاران، ۲۰۲۳). در سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای در کشورهای مختلف روی ارقام سیب‌زمینی برای افزایش بهره‌وری و سازگاری با شرایط نامساعد صورت گرفته است (بهادری^۸ و همکاران، ۲۰۲۳). این ارقام علاوه بر افزایش عملکرد، به بهبود کیفیت محصول و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کنند (کین^۹ و همکاران، ۲۰۲۴، ۲۰۲۴). خشکی تأثیرات متعددی بر گیاه دارد، از جمله کاهش فشار تورگور و استحکام سلولی، افت سرعت فتوسنتز (باندروسکا، ۲۰۲۲)

1. Seleiman
2. *Solanum tuberosum*
3. Bandurska
4. El-Feky
5. Azab
6. Singh
7. Abou-Sreea
8. Bahadori
9. Qin

و کاهش جذب عناصر غذایی به دلیل کاهش فعالیت ریشه‌ها که بر رشد و کیفیت محصول اثر منفی می‌گذارد (کندهال^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). در این زمینه، سیلیکات‌پتاسیم^۲ به عنوان منبعی غنی از سیلیکون محلول و پتاسیم قابل جذب اهمیت یافته است (ابوسرا و همکاران، ۲۰۲۳). این ترکیب به شکل پودر یا مایع شفاف موجود بوده و ساختار پلیمری آن با انحلال پذیری مناسب، شرایط جذب مؤثر عناصر غذایی را برای گیاه فراهم می‌سازد (حافظ^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). پتاسیم نقش کلیدی در تنظیم فشار اسمزی، باز و بسته شدن روزنه‌ها و انتقال مواد فتوسنتزی ایفا می‌کند، درحالی که سیلیکون به صورت مونوسیلیکات^۴ جذب شده و در دیواره سلولی و اپیدرم تجمع می‌یابد و استحکام و مقاومت گیاه در برابر تنش‌ها را افزایش می‌دهد (آزاب و همکاران، ۲۰۲۳؛ ابوسرا و همکاران، ۲۰۲۳). از مهم‌ترین اثرات سیلیکات‌پتاسیم ارتقای بازده فتوسنتز است؛ این ترکیب با افزایش سنتز کلروفیل، تقویت کلروپلاست‌ها و بهبود ثبات آن‌ها در برابر استرس اکسیداتیو، فرایند جذب و تبدیل انرژی نوری را بهبود می‌بخشد (حافظ و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین یون پتاسیم با تنظیم روزنه‌ها موجب افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌شود (قبال^۵ و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، سیلیکات‌پتاسیم از طریق مجموعه‌ای از سازوکارهای فیزیولوژیک و ساختاری، بهبود قابل توجهی در تعادل آبی، فتوسنتز و کارایی دستگاه فتوسنتزی در گیاهان تحت تنش خشکی ایجاد می‌کند (شکری^۶ و همکاران، ۲۰۲۲).

۲.۲. پیشینه تجربی

مطالعات مختلف بر روی سیب‌زمینی و سایر گیاهان خانواده سولاناسه نشان داده‌اند که سیلیکات‌پتاسیم در شرایط خشکی موجب بهبود رشد، عملکرد و مقاومت فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان می‌شود (حافظ و همکاران، ۲۰۲۱). در پژوهشی روی سیب‌زمینی، محلول پاشی ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات‌پتاسیم همراه با تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی بالاترین وزن غده و عملکرد کل را به همراه داشت و شاخص برداشت، کارایی مصرف آب و محتوای نسبی آب برگ افزایش یافت، درحالی که نشت الکترولیت‌ها کاهش یافت (ال‌شارکوی^۷ و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، محلول پاشی این ترکیب موجب افزایش رنگ‌بندی‌های فتوسنتزی، پرولین و متابولیت‌های ثانویه و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها شد که بیانگر کاهش تنش اکسیداتیو است (آرافا^۸ و همکاران، ۲۰۲۴). پژوهشی دیگر نشان داد که سیلیکات‌پتاسیم شاخص کلروفیل، سطح برگ، محتوای نسبی آب و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را به‌ویژه تحت خشکی شدید بهبود داد (گادالا^۹ و همکاران، ۲۰۲۲). در گوجه‌فرنگی نیز کاربرد سیلیکات‌پتاسیم رشد رویشی، کلروفیل و عملکرد میوه را افزایش داده و با کاهش هیدروژن پراکسید و افزایش فعالیت کاتالاز و پراکسیداز، مقاومت گیاه را تقویت کرد (محمد^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۳). در بادمجان، این ترکیب موجب افزایش ارتفاع گیاه، تعداد برگ، عملکرد میوه، پرولین، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و محتوای نسبی آب شد (ال‌فکی و همکاران، ۲۰۲۳). در فلفل نیز افزایش تعداد میوه، وزن خشک، کارایی مصرف آب و ترکیبات فنلی و کاهش آسیب غشایی گزارش شده است (محمود^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۱).

1. Kandhol
2. Potassium Silicate
3. Hafez
4. Monosilicic Acid
5. Iqbal
6. Shokri
7. El-Sharkawy
8. Arafat
9. Gadallah
10. Mohamed
11. Mahmoud

بررسی‌ها روی سیب‌زمینی رقم Hermes نشان داد که نانوسیلیکات پتاسیم در غلظت ۱۰۰ پی‌پی‌ام بیش‌ترین تأثیر را در بهبود رشد، محتوای کلروفیل و عملکرد بازپسند داشت (عبدالظاهر^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، سیلیکات پتاسیم ۱ و ۲ درصد در ترکیب با عصاره جلبک، مانع افت سفتی غده‌ها در طول نگهداری شد (شی‌هتا^۲، ۲۰۱۸). علاوه بر این، کاربرد پتاسیم سولفات (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) موجب بهبود رشد، عملکرد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در سیب‌زمینی شد، به‌ویژه تحت آبیاری جزئی ریشه (فهاد^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج مشابهی در گندم نشان داد که سیلیکات پتاسیم در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار موجب افزایش کلروفیل، فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب اکسیداتیو شد (امینی‌فرد^۴ و همکاران، ۲۰۱۴).

۳. روش‌شناسی پژوهش

آزمایش حاضر در سال ۱۴۰۳ و در مزرعه تحقیقاتی واقع در روستای چورمق، از توابع شهرستان کبودرآهنگ در استان همدان اجرا شد. این منطقه در فاصله حدود ۵۲ کیلومتری شمال شهر همدان قرار دارد و از نظر موقعیت جغرافیایی، در بین طول‌های جغرافیایی ۴۸ تا ۴۹ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۴ تا ۳۶ درجه شمالی واقع شده است. ارتفاع این منطقه از سطح دریا تقریباً ۱۶۶۰ متر بوده و در زمره مناطق با اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار می‌گیرد. این پژوهش به‌منظور بررسی اثرات متقابل رژیم‌های مختلف آبیاری، محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم و ارقام مختلف سیب‌زمینی بر شاخص‌های زراعی و فیزیولوژیک گیاه، به‌صورت کرت‌های دو بار خردشده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در یک مزرعه تحقیقاتی اجرا شد. ساختار این طرح به‌گونه‌ای تنظیم شد که امکان ارزیابی دقیق اثرات مستقل و تعاملی هر سه عامل را فراهم سازد. عامل اصلی شامل سه سطح رژیم آبیاری بود: آبیاری در فواصل هفت، ۱۰ و ۱۳ روز یک‌بار، با حجم ثابت و معین در هر نوبت. به‌منظور جلوگیری از تداخل آبیاری بین تیمارها، کرت‌های اصلی با مرزهای خاکی و شیب مناسب جهت زهکشی جدا شدند و تیمارها به‌صورت کاملاً مستقل اعمال گردیدند. سیستم آبیاری با استفاده از لوله‌های تیپ با قطر اسمی ۱۶ میلی‌متر و خروجی‌های یکنواخت به فواصل ۲۰ سانتی‌متر اجرا شد. در هر کرت فرعی فرعی به مساحت تقریبی ۱۵ مترمربع (۳×۵ متر)، دو ردیف تیپ به موازات ردیف‌های کشت نصب گردید. فشار سیستم در بازه ۰/۸ تا ۱ بار تثبیت و با فشارسنج در ابتدای هر آبیاری کنترل شد. نوارهای تیپ به خطوط اصلی از جنس پلی‌اتیلن متصل شده و از طریق شیرهای انفرادی مجزا کنترل می‌شدند تا اعمال تیمارهای آبی به‌صورت مستقل و دقیق انجام گیرد. جهت محاسبه نیاز آبی گیاه، تبخیر و تعرق مرجع^۵ بر پایه داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک مجاور و با استفاده از معادله FAO Penman-Monteith برآورد شد. سپس با در نظر گرفتن ضرایب گیاهی برای مراحل مختلف رشد سیب‌زمینی و راندمان کاربرد سیستم (۹۰ درصد)، مقدار نیاز آبی خالص در طول فصل رشد تعیین گردید. در مرحله رشد میانی، نیاز آبی روزانه گیاه حدود ۶/۵ میلی‌متر برآورد شد و حجم تقریبی ۴۵ تا ۵۰ لیتر در هر نوبت آبیاری برای هر کرت تأمین گردید. زمان آبیاری با کروномتر و فشار سیستم با مانومتر کنترل شد. در تیمارهای دارای تنش آبی، با حفظ ثابت حجم آب، تنها فاصله بین آبیاری‌ها به‌ترتیب به ۱۰ و ۱۳ روز افزایش یافت. پیش از هر دور آبیاری، رطوبت خاک در عمق‌های صفر-۲۰ و ۲۰-۴۰ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه TDR قابل‌حمل (مدل FieldScout TDR 300، ساخت

1. Abdel-Zaher
2. Shehata
3. Fahad
4. Aminifard
5. ET_o

شرکت Spectrum Technologies Inc، ایالات متحده آمریکا، ۲۰۱۹) و نمونه‌برداری دستی اندازه‌گیری شد تا اعمال دقیق تنش خشکی مورد تأیید قرار گیرد عامل فرعی آزمایش، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم در سه سطح شامل شاهد (اسپری با آب خالص به‌عنوان کنترل حامل)، یک‌بار محلول‌پاشی در ۵۰ روز پس از کشت و دو بار محلول‌پاشی در ۴۰ و ۸۰ روز پس از کشت بود. محلول‌پاشی‌ها با استفاده از محلول حاوی ۲ لیتر کود سیلیکات‌پتاسیم (با خلوص ۲۴ درصد سیلیکون و ۱۱ درصد پتاسیم، pH برابر با ۱۱/۵) در هزار لیتر آب (غلظت نهایی ۰/۲ درصد) تهیه شده و در مخزن همزن‌دار کاملاً یکنواخت‌سازی شد. در تیمار شاهد به‌منظور کنترل اثر مکانیکی اسپری، آب مقطر/آب شهری تصفیه‌شده به همان حجم و با همان دستگاه و در زمان‌های متناظر (یک‌بار یا دو نوبت مطابق برنامه) پاشیده شد. عملیات پاشش با سم‌پاش پستی دستی ۲۰ لیتری دارای نازل مخروطی قابل تنظیم و در ساعات اوایل صبح یا اواخر عصر انجام شد؛ در هر واحد آزمایشی (۲×۳ متر) حدود ۱/۵ لیتر محلول یا آب مصرف گردید و از ایجاد چکه یا روان‌آب جلوگیری شد. تجهیزات پس از هر نوبت شست‌وشو شده و کلیه پاشش‌ها به‌طور هم‌زمان برای تمام تکرارها تحت شرایط اقلیمی یکسان انجام شد.

سه رقم سیب‌زمینی کورسیکا، ووگ و سانته بود. این ارقام به‌دلیل تفاوت‌های ژنتیکی، توان عملکردی، و واکنش‌های متفاوت به تنش خشکی انتخاب شدند به‌عبارت دیگر در این پژوهش سه رقم با پیشینه و صفات اصلاحی متفاوت به‌کار گرفته شد تا پاسخ‌های فیزیولوژیک و عملکردی در شرایط تنش آبی و محلول‌پاشی مقایسه‌پذیر باشند.

رقم کورسیکا (Agrico Research B.V) که در برنامه‌های اصلاحی این شرکت معرفی شده و به‌عنوان رقمی با پتانسیل ژنتیکی و عملکردی بالا و غده‌بندی زیاد شناخته می‌شود، برای تولید صنعتی (چیپس) اصلاح شده است؛ غده‌های گرد-بیضی با چشم‌های کم‌عمق و گوشت زرد، قابلیت یکنواختی شکل و اندازه و ظرفیت انبارداری طولانی از ویژگی‌های بارز آن می‌باشند و به همین دلیل از نظر مدیریت پس از برداشت و بازاریابی تفاوت‌هایی با سایر ارقام دارد (زاک^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). رقم ووگ: (Konst Research B.V حاصل تلاقی Marabel× Amorosa) دوره رشد کوتاه‌تری (حدود ۹۰-۱۱۰ روز) دارد، غده‌های بزرگ و یکنواخت با ماده خشک حدود ۱۷/۳ درصد تولید می‌کند و بیش‌تر برای مصرف تازه مناسب و برای نگهداری کوتاه‌مدت توصیه می‌شود؛ این رقم از نظر حساسیت به برخی بیماری‌ها (به‌ویژه بلایت دیررس در شاخ‌وبرگ) و آسیب‌های مکانیکی هنگام برداشت تفاوت‌هایی با کورسیکا و سانته نشان داده و نیازمند مدیریت زراعی و تغذیه‌ای مشخصی (مثلاً تنظیم نیتروژن و پتاسیم) است (کین و همکاران، ۲۰۲۴). رقم سانته: (Agrico Research B.V) به‌عنوان یک رقم میان‌رس با درصد ماده خشک بالاتر (۲۰/۸ درصد) و وزن مخصوص مناسب (۳۸۶ گرم در لیتر) معرفی شده و مقاومت بالاتری نسبت به برخی بیماری‌های مزمن (مانند گال و برخی نماتدها) دارد (زاک^۱ و همکاران، ۲۰۲۱)، بنابراین برای مقایسه عملکرد و پایداری در شرایط مزرعه به‌عنوان رقم شاهد انتخاب شد؛ سانته علاوه بر قابلیت انبارداری مناسب، از نظر حساسیت به علف‌کش‌ها و برخی مشکلات پس از برداشت نیز پروفایل متفاوتی نسبت به کورسیکا و ووگ دارد.

بستر کاشت در هر کرت فرعی فرعی با شخم عمیق، دیسک و تسطیح کامل آماده شد تا شرایط مناسب برای رشد ریشه و توسعه غده‌ها فراهم گردد. کاشت بوته‌ها در فواصل ۷۵ سانتی‌متر بین ردیف و ۲۰ سانتی‌متر روی ردیف انجام شد تا تراکم مطلوب ایجاد شود، رقابت بین بوته‌ها کاهش یابد و پوشش کامل گیاهی شکل گیرد. تاریخ دقیق کاشت ۵ اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۴ و برداشت ۲۵ مردادماه ۱۴۰۴ بود. طرح آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل سه فاصله آبیاری (هفت، ۱۰ و ۱۳ روز)، عامل فرعی سه سطح محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم (شاهد، یک‌بار در ۵۰ روزگی و دو بار در ۴۰ و ۸۰ روزگی) و

عامل فرعی‌تر سه رقم سیب‌زمینی (کورسیکا، سائته و ووگ) بود. در هر تکرار، سه کرت اصلی برای رژیم آبیاری، هر کرت اصلی شامل سه کرت فرعی برای تیمار محلول‌پاشی و هر کرت فرعی شامل سه کرت فرعی برای ارقام سیب‌زمینی بود، بنابراین در هر تکرار ۲۷ واحد آزمایشی و در کل طرح ۸۱ واحد مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایش، قبل از کاشت و شروع آزمایش، از پنج قسمت از خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری به‌عمل آمد و پس از خرد کردن کلوخه‌ها، نمونه‌ها از الک ۳ میلی‌متری گذرانده شدند. سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه از لحاظ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است. کودهای پایه شامل نیتروژن، فسفر و پتاسیم بودند که براساس آزمون خاک پیش از کاشت به‌صورت یکنواخت اعمال شدند. کود فسفر و پتاسیم به‌صورت نواری و مخلوط با خاک و نیتروژن به‌روش ترکیبی (۷۰ درصد پیش از کاشت و ۳۰ درصد به‌صورت سرک در مرحله شروع غده‌بندی) استفاده شد. عملیات مدیریت مزرعه شامل آماده‌سازی خاک با شخم عمیق و تسطیح برای بهبود تهویه و نفوذپذیری، کنترل علف‌های هرز با ترکیب وجین دستی و ابزارهای مکانیکی و کنترل آفات و بیماری‌ها مطابق دستورالعمل‌های فنی به‌صورت مکانیکی و شیمیایی بود. تمام تیمارها با دقت یکنواخت اجرا شدند تا اختلاف در مصرف مواد و کنترل آفات به حداقل برسد. فواصل استاندارد بین کرت‌ها رعایت شد تا از اثر متقابل تیمارها جلوگیری شود. علاوه بر این، عوامل محیطی ناهمگن شامل شیب زمین، میزان تابش نور و سایه تا حد امکان یکنواخت‌سازی شدند تا تفاوت‌های مشاهده‌شده، بیش‌تر ناشی از اثرات آزمایشی باشد. همچنین، برای کاهش خطای آزمایشی و اثر متقابل تیمارها، فواصل مناسب بین کرت‌ها در نظر گرفته شد و عوامل محیطی ناهمگن مانند شیب و نور نیز تا حد امکان یکنواخت‌سازی شدند. در این پژوهش، صفات عملکرد غده، محتوای کلروفیل کل، پروتئین محلول، کربوهیدرات کل، پرولین و مالون‌دی‌آلدهید مورد بررسی قرار گرفتند. عملکرد غده از طریق برداشت غده‌ها از کرت‌های آزمایشی و توزین آن‌ها برحسب تن در هکتار تعیین شد. برای اندازه‌گیری مقدار کلروفیل کل، از روش اسپکتروفتومتری براساس جذب نوری در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر استفاده شد. در این روش، ابتدا نمونه برگ‌ها از گیاهان برداشت و پس از عصاره‌گیری در محلول مناسب، میزان کلروفیل با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. جذب نور در این طول موج‌ها برای تعیین میزان کلروفیل a و b انجام گرفت که به‌طور مستقیم نشان‌دهنده وضعیت فتوسنتز گیاه است (آرنون^۱، ۱۹۴۹). برای تعیین پروتئین محلول، پس از عصاره‌گیری پروتئین‌ها از بافت گیاهی، محلول برادفورد به نمونه‌ها اضافه گردید که موجب تغییر رنگ و تشکیل کمپلکسی رنگی با پروتئین‌ها می‌شود. سپس جذب نور در طول موج ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری و از روی منحنی استاندارد پروتئین، غلظت پروتئین‌ها محاسبه شد (بردفورد^۲، ۱۹۷۶). میزان کربوهیدرات کل با استفاده از روش فنول-سولفوریک‌اسید اندازه‌گیری شد. در این روش، پس از عصاره‌گیری کربوهیدرات‌ها از بافت گیاهی، محلول فنول-سولفوریک‌اسید به نمونه‌ها اضافه شد که منجر به تغییر رنگ محلول می‌شود. شدت رنگ ایجادشده در طول موج ۴۹۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و میزان کربوهیدرات کل در نمونه‌ها محاسبه شد (دوباس^۳ و همکاران، ۱۹۵۶). برای تعیین محتوای پرولین، از واکنش پرولین با نین‌هیدرین در محیط اسیدی استفاده شد. در این روش، عصاره‌های گیاهی تحت واکنش با نین‌هیدرین قرار گرفتند و پس از گرما، محصول نهایی به رنگ قرمز متمایل به نارنجی در آمد. شدت رنگ حاصل در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و میزان پرولین براساس

منحنی استاندارد محاسبه شد (باتیس^۱ و همکاران، ۱۹۷۳). هم‌چنین، برای سنجش میزان مالون‌دی‌آلدهید که شاخصی از پراکسیداسیون لیپیدی است، از روش تیوباربیتوریک اسید^۲ استفاده شد. در این روش، بعد از استخراج مالون‌دی‌آلدهید از بافت گیاهی، تیوباربیتوریک‌اسید به نمونه اضافه شد و واکنش میان این ترکیب و مالون‌دی‌آلدهید موجب تشکیل کمپلکسی رنگی شد که جذب آن در طول موج ۵۳۲ نانومتر اندازه‌گیری شد. این روش برای اندازه‌گیری آسیب‌های اکسیداتیو، به‌ویژه در غشاهای سلولی که ناشی از پراکسیداسیون چربی‌هاست، کاربرد دارد (هیت^۳، ۱۹۶۸). در انتها داده‌های حاصل از آزمایش نیز با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) مورد تجزیه واریانس قرار گرفته و میانگین‌ها به‌وسیله آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار^۴ (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. برای رسم شکل‌ها از برنامه اکسل^۵ ورژن ۲۰۱۳ استفاده گردید.

جدول ۱. مشخصات خاک محل آزمایش

عمق نمونه (سانتی‌متر)	اسیدیته -	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	پتاسیم (پی‌پی‌ام)	فسفر (پی‌پی‌ام)	نیترژن (درصد)	کربن آلی (درصد)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	بافت خاک
۰-۳۰	۸/۰۱	۰/۳۰	۳۰۴	۲۷/۳	۰/۱۳	۱/۳۲	۲۶	۴۳	۳۱	سیلتی لوم

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. عملکرد

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی رژیم آبیاری، محلول‌پاشی با سیلیکات‌پتاسیم و رقم در سطح احتمال ۱ درصد و اثر برهم‌کنش سه‌گانه این تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد بر عملکرد سیب‌زمینی معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین عملکرد مربوط به تیمار آبیاری هر هفت روز یک‌بار، همراه با دو نوبت محلول‌پاشی و رقم کورسیکا بود که میانگین آن به ۶۱/۴۴ تن در هکتار رسید (جدول ۳). در همین شرایط آبیاری، کم‌ترین عملکرد در تیمار شاهد و رقم سانه ثبت شد (۳۹/۶۰ تن در هکتار). در تیمارهای آبیاری هر ۱۰ روز، محلول‌پاشی دو نوبته نیز موجب افزایش عملکرد شد، به‌طوری‌که عملکرد رقم کورسیکا از ۵۰/۱۴ در تیمار شاهد به ۵۴/۲۱ تن در هکتار رسید (جدول ۳). در شرایط تنش شدید آبی (آبیاری هر ۱۳ روز)، گرچه سطح عملکرد در همه تیمارها کاهش یافت، اما اثرات مثبت محلول‌پاشی همچنان محسوس بود، به‌ویژه در رقم کورسیکا که عملکرد آن از ۴۲/۲۵ در تیمار شاهد به ۴۹/۷۱ تن در هکتار تحت تیمار دو بار محلول‌پاشی افزایش یافت (جدول ۳). در مقایسه میانگین‌های ارقام، رقم کورسیکا در اکثر شرایط دارای بیش‌ترین عملکرد و رقم سانه دارای کم‌ترین مقدار بود. به‌طور کلی، افزایش دفعات محلول‌پاشی از صفر به دو نوبت، در تمامی شرایط آبیاری و برای همه ارقام با افزایش عملکرد همراه بود. فاصله بین بیش‌ترین و کم‌ترین عملکرد ثبت‌شده برابر با ۲۹/۶۲ تن در هکتار (۶۱/۴۴ در برابر ۳۱/۸۲) بود که بیانگر اختلافی نزدیک به ۴۸ درصد است. این اختلاف معنی‌دار اهمیت انتخاب هم‌زمان سطح مناسب آبیاری، محلول‌پاشی مؤثر و رقم برتر را در بهینه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی نشان می‌دهد.

1. Bates
2. Thiobarbituric Acid
3. Heath
4. Least Significant Difference
5. Excel

تعدیل اثرات کم‌آبی در سیب‌زمینی با محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم: بررسی فیزیولوژیک و ... / علی‌اصغر فزونی و همکاران ۷۰۳

جدول ۲. تجزیه واریانس عملکرد و صفات فیزیولوژی سه رقم سیب‌زمینی تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد	کلروفیل	پروتئین محلول	کربوهیدرات کل	پرولین	مالون‌دی‌آلدئید
بلوک	۲	۱۰۹/۰۸ ^{**}	۰/۰۹ ^{ns}	۰/۴۴ ^{**}	۰/۱۹ ^{ns}	۰/۰۶ ^{ns}	۹/۱۱ ^{**}
رژیم آبیاری (عامل اصلی A)	۲	۱۴۴/۴۴ ^{**}	۰/۵۵ ^{**}	۵۰/۱۸۲ ^{**}	۵۱/۵۵ ^{**}	۲۹۸/۹۷ ^{**}	۱۱۲۶/۵۰ ^{**}
خطای a	۴	۲۲/۶۱	۰/۰۰۵	۰/۴۷	۰/۴۶	۰/۴۱	۰/۰۹
محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم (عامل فرعی B)	۲	۶۰/۶۸ ^{**}	۰/۲۸ ^{**}	۲۸/۴۹ ^{**}	۲۹/۳۸ ^{**}	۱۰۸/۳۴ ^{**}	۲۱/۵۲ ^{**}
A × B	۴	۱۳/۵۴ ^{**}	۰/۰۶ ^{**}	۵/۲۱ [*]	۶/۳۷ [*]	۴/۲۶ [*]	۱۵/۳۴ ^{**}
خطای b	۱۸	۲/۶۲	۰/۰۴	۰/۷۲	۰/۸۷	۰/۹۵	۰/۰۹
رقم (عامل فرعی در فرعی C)	۲	۵۲/۶۸ ^{**}	۰/۲۲ ^{**}	۴۹/۵۹ ^{**}	۳۸/۶۵ ^{**}	۲۲۵/۳۱ ^{**}	۷۳/۳۶ ^{**}
A × C	۴	۱۰/۱۹ ^{ns}	۰/۰۸ ^{**}	۶/۶۲ [*]	۹/۲۱ ^{**}	۹/۹۲ ^{**}	۲۱/۲۶ ^{**}
B × C	۴	۱۳/۳۰ [*]	۰/۰۶ ^{**}	۳/۹۶ ^{ns}	۶/۵۱ [*]	۸/۸۵ ^{**}	۱۴/۵۹ ^{**}
A × B × C	۸	۲۰/۱۱ [*]	۰/۰۷ ^{**}	۶/۴۱ [*]	۶/۱۹ [*]	۱۱/۳۱ ^{**}	۱۱/۴۱ ^{**}
خطای c	۳۰	۳/۹۹	۰/۰۰۱	۱/۰۵	۱/۴۱	۰/۹۳	۲/۰۲
ضریب تغییرات (درصد)		۵/۴۶	۴/۵۶	۵/۰۲	۷/۱۳	۶/۷۲	۶/۱۱

*, **, و *** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و بدون اختلاف معنی‌داری می‌باشد.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سطوح آبیاری در محلول‌پاشی در رقم بر عملکرد و ویژگی‌های فیزیولوژی سه رقم سیب‌زمینی

تیمارهای آزمایشی			مقایسه میانگین‌ها			
رژیم آبیاری	محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم	رقم	عملکرد (تن در هکتار)	کلروفیل (میلی گرم بر گرم وزن تر)	پروتئین محلول (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	کربوهیدرات کل (میکرومول بر گرم وزن خشک)
بدون تنش (آبیاری هر هفت روز یک بار)	شاهد	کورسیکا	۵۲/۵۰ ^{bc}	۱/۷۵ ^{cd}	۱۰/۸۹ ^{de}	۱۲/۶۸ ^{ef}
	شاهد	ووگ	۴۲/۳۰ ^{fg}	۱/۴۶ ^{lmn}	۸/۹۲ ^{hi}	۹/۷۰ ^g
	شاهد	سانته	۳۹/۶۰ ^{gh}	۱/۳۸ ^{nop}	۸/۴۰ ^{ij}	۹/۰۶ ^{gh}
	یک بار محلول‌پاشی	کورسیکا	۵۲/۵۶ ^b	۱/۷۷ ^{bc}	۱۱/۰۲ ^{cd}	۱۳/۰۲ ^e
	یک بار محلول‌پاشی	ووگ	۴۸/۵۱ ^{cd}	۱/۶۵ ^{hij}	۱۰/۲۱ ^{ef}	۱۱/۱۴ ^f
	یک بار محلول‌پاشی	سانته	۴۲/۰۲ ^{fg}	۱/۴۴ ^{mno}	۸/۸۲ ^{hi}	۹/۴۵ ^g
	دو بار محلول‌پاشی	کورسیکا	۶۱/۴۴ ^a	۲/۲۶ ^a	۹/۸۹ ^{fg}	۱۴/۸۰ ^d
تنش ملایم خشکی (آبیاری هر ۱۰ روز یک بار)	دو بار محلول‌پاشی	ووگ	۵۳/۵۲ ^b	۱/۸۰ ^b	۱۱/۲۲ ^{cd}	۱۶/۹۷ ^c
	دو بار محلول‌پاشی	سانته	۴۷/۶۴ ^{de}	۱/۶۱ ^{ijk}	۹/۹۷ ^{fg}	۱۶/۱۲ ^c
	شاهد	کورسیکا	۵۰/۱۴ ^c	۱/۶۸ ^{ghi}	۱۳/۲۰ ^{bc}	۱۸/۱۶ ^b
	شاهد	ووگ	۳۷/۵۵ ^h	۱/۳۲ ^{pqr}	۷/۹۷ ^{jk}	۱۴/۸۷ ^d
	شاهد	سانته	۳۴/۸۵ ^{hi}	۱/۲۴ ^{tuv}	۷/۴۵ ^{kl}	۱۴/۰۱ ^{de}
	یک بار محلول‌پاشی	کورسیکا	۵۱/۸۸ ^{bc}	۱/۷۲ ^{efg}	۱۳/۴۷ ^b	۱۸/۹۸ ^b
	یک بار محلول‌پاشی	ووگ	۴۳/۲۷ ^{efg}	۱/۴۹ ^{klm}	۹/۱۶ ^{gh}	۱۷/۰۱ ^c
تنش شدید خشکی (آبیاری هر ۱۳ روز یک بار)	یک بار محلول‌پاشی	سانته	۳۶/۷۹ ^h	۱/۲۹ ^{stu}	۷/۷۷ ^{jk}	۱۴/۷۰ ^d
	دو بار محلول‌پاشی	کورسیکا	۵۴/۲۱ ^b	۱/۷۲ ^{def}	۱۴/۹۴ ^a	۲۱/۱۲ ^a
	دو بار محلول‌پاشی	ووگ	۴۸/۴۰ ^{cd}	۱/۶۵ ^{hij}	۱۰/۲۰ ^{ef}	۱۲/۴۰ ^{ef}
	دو بار محلول‌پاشی	سانته	۴۳/۹۶ ^{efg}	۱/۵۰ ^k	۹/۲۳ ^{gh}	۱۱/۲۳ ^f
	شاهد	کورسیکا	۴۲/۲۵ ^{fg}	۱/۲۹ ^{stu}	۶/۲۰ ⁿ	۸/۴۵ ^h
	شاهد	ووگ	۳۴/۳۵ ⁱ	۱/۲۲ ^{uvw}	۵/۰۱ ^{pq}	۷/۰۳ ^j
	شاهد	سانته	۳۲/۲۹ ^{ij}	۱/۱۰ ^{xy}	۴/۷۰ ^q	۶/۶۳ ^j
تنش شدید خشکی (آبیاری هر ۱۳ روز یک بار)	یک بار محلول‌پاشی	کورسیکا	۴۸/۵۱ ^{cd}	۱/۳۰ ^{rst}	۷/۱۴ ^{lm}	۹/۵۹ ^g
	یک بار محلول‌پاشی	ووگ	۳۶/۸۵ ^h	۱/۱۵ ^{wx}	۵/۴۴ ^{op}	۷/۵۲ ⁱ
	یک بار محلول‌پاشی	سانته	۳۱/۸۲ ^j	۱/۱۵ ^{wx}	۴/۵۹ ^q	۶/۴۹ ^j
	دو بار محلول‌پاشی	کورسیکا	۴۹/۷۱ ^c	۱/۶۹ ^{fgh}	۸/۳۲ ^{ij}	۱۱/۰۲ ^f
	دو بار محلول‌پاشی	ووگ	۴۳/۴۲ ^{efg}	۱/۵۰ ^{kl}	۶/۴۸ ^{mn}	۸/۷۹ ^{gh}
	دو بار محلول‌پاشی	سانته	۳۷/۴۹ ^h	۱/۳۱ ^{qrs}	۵/۴۸ ^o	۷/۵۷ ⁱ

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

ادامه جدول ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سطوح آبیاری در محلول‌پاشی در رقم بر عملکرد و ویژگی‌های فیزیولوژی سه رقم سیب‌زمینی

تیمارهای آزمایشی			مقایسه میانگین‌ها	
رژیم آبیاری	محلول پاشی سیلیکات پتاسیم	رقم	پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر)	مالون‌دی‌آلدهید (نانومول بر گرم وزن تر)
بدون تنش (آبیاری هر هفت روز یک‌بار)	شاهد	کورسیکا	۸/۹۰o	۴/۷۴n
	شاهد	ووگ	۸/۲۰p	۴/۳۴o
	شاهد	سانته	۱۱/۵۹n	۶/۴۰m
	یک بار محلول پاشی	کورسیکا	۸/۹۲o	۴/۶۸n
	یک بار محلول پاشی	ووگ	۸/۲۹p	۴/۴۲o
	یک بار محلول پاشی	سانته	۷/۴۱q	۳/۹۷q
	دو بار محلول پاشی	کورسیکا	۶/۵۵r	۳/۰۲r
	دو بار محلول پاشی	ووگ	۷/۴۷q	۴/۲۳p
	دو بار محلول پاشی	سانته	۸/۱۱p	۵/۷۱m
تنش ملایم خشکی (آبیاری هر ۱۰ روز یک‌بار)	شاهد	کورسیکا	۱۶/۷۳k	۶/۸۷l
	شاهد	ووگ	۱۷/۸۲z	۹/۱۶i
	شاهد	سانته	۲۴/۲۱g	۱۰/۰۶h
	یک بار محلول پاشی	کورسیکا	۱۳/۷۵m	۶/۸۴lm
	یک بار محلول پاشی	ووگ	۲۰/۹۹h	۱۳/۰۲g
	یک بار محلول پاشی	سانته	۱۹/۸۵h	۱۲/۱۸gh
	دو بار محلول پاشی	کورسیکا	۱۶/۴۱k	۷/۳۶k
	دو بار محلول پاشی	ووگ	۱۴/۴۰l	۸/۵۸j
	دو بار محلول پاشی	سانته	۱۸/۹۵i	۹/۹۲hi
تنش شدید خشکی (آبیاری هر ۱۳ روز یک‌بار)	شاهد	کورسیکا	۳۴/۵۴d	۱۶/۶۸d
	شاهد	ووگ	۳۸/۷۲d	۱۸/۸۶c
	شاهد	سانته	۵۳/۶۹a	۲۵/۱۴a
	یک بار محلول پاشی	کورسیکا	۳۰/۰۳f	۱۴/۷۵f
	یک بار محلول پاشی	ووگ	۳۳/۸۹d	۱۶/۵۹de
	یک بار محلول پاشی	سانته	۴۴/۸۸b	۲۰/۲۹b
	دو بار محلول پاشی	کورسیکا	۲۹/۸۴f	۱۴/۹۹ef
	دو بار محلول پاشی	ووگ	۳۲/۰۸e	۱۵/۶۶e
	دو بار محلول پاشی	سانته	۳۷/۸۲ c	۱۸/۲۵ cd

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

۲.۴. کلروفیل

محتوای کلروفیل برگ سیب‌زمینی در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر اثرات اصلی و متقابل رژیم آبیاری، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم و رقم قرار گرفت (جدول ۲). بیش‌ترین میزان کلروفیل (۲/۲۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در تیمار آبیاری هر هفت روز یک‌بار، همراه با دو بار محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم و در رقم کورسیکا مشاهده شد. این رقم در اکثر شرایط، به‌ویژه در سطوح مختلف محلول‌پاشی، بالاترین توانایی حفظ کلروفیل را نشان داد و نسبت به سایر ارقام از پایداری فیزیولوژیکی بیش‌تری برخوردار بود (جدول ۳). در مقایسه میان سطوح مختلف آبیاری، مشخص شد که افزایش فاصله آبیاری از هفت به ۱۳ روز، به‌ویژه در تیمارهای فاقد محلول‌پاشی، منجر به کاهش معنی‌دار کلروفیل شد. در تیمار تنش شدید آبی (آبیاری ۱۳ روز یک‌بار)، مقدار کلروفیل در رقم سانته بدون محلول‌پاشی به میانگین ۱/۱۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر رسید که پایین‌ترین مقدار ثبت‌شده در کل تیمارها بود (جدول ۳). محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم، به‌ویژه در تیمار دو بار محلول‌پاشی، سبب افزایش معنی‌دار مقدار کلروفیل

شد. در همه ارقام و سطوح آبیاری، این تیمار موجب بهبود وضعیت کلروفیل شد، اما اثر افزایشی آن در شرایط تنش آبی بیش‌تر نمایان شد. به‌طوری‌که، در رقم کورسیکا تحت آبیاری ۱۳ روز یک‌بار، دو بار محلول‌پاشی توانست سطح کلروفیل را تا حدود ۱/۷۰ حفظ کند، درحالی‌که در تیمار شاهد مقدار کلروفیل به حدود ۱/۲۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر کاهش یافته بود (جدول ۳). از نکات قابل‌توجه دیگر آن‌که در تمام سطوح آبیاری، تیمار یک‌بار محلول‌پاشی در رقم کورسیکا عملکردی نزدیک به دو بار محلول‌پاشی در ارقام دیگر داشت (جدول ۳). این موضوع نشان‌دهنده کارایی ذاتی بالای رقم کورسیکا در بهره‌برداری از منابع درون‌زا و بیرونی جهت حفظ ثبات فیزیولوژیکی است. مقایسه ارقام نشان داد که رقم کورسیکا برتر از ووگ و سانته بود و در تمامی سطوح محلول‌پاشی و آبیاری، بیش‌ترین میانگین محتوای کلروفیل را حفظ کرد. رقم ووگ در رتبه دوم قرار داشت و رقم سانته در اغلب تیمارها کم‌ترین مقدار را نشان داد. با این‌حال، در برخی ترکیب‌های تیماری (مانند دو بار محلول‌پاشی در آبیاری هفت روز یک‌بار)، اختلاف بین کورسیکا و ووگ کاهش یافت (جدول ۳) که می‌تواند به ظرفیت تعدیل پاسخ ارقام مختلف در شرایط غیرتنش‌زا نسبت داده شود. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که استفاده از سیلیکات‌پتاسیم می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر برای حفظ ثبات کلروفیلی و کارکردهای فتوسنتزی در سیب‌زمینی تحت تنش آبی مدنظر قرار گیرد و رقم کورسیکا، به‌واسطه قابلیت ذاتی بالاتر در حفظ پایداری فیزیولوژیکی، گزینه‌ای برتر در شرایط کم‌آبی محسوب می‌شود.

۳.۴. پروتئین محلول

اثرات ساده رژیم آبیاری، محلول‌پاشی با سیلیکات‌پتاسیم و رقم در سطح احتمال ۱ درصد و اثر برهم‌کنش رژیم آبیاری در رقم و هم‌چنین اثر برهم‌کنش سه‌گانه تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد بر پروتئین محلول سیب‌زمینی معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین مقدار این ترکیب در تیمار آبیاری با فواصل ۱۰ روز یک‌بار، محلول‌پاشی دوباره سیلیکات‌پتاسیم و رقم کورسیکا به‌دست آمد که میانگین مقدار آن برابر با ۱۴/۹۴ میلی‌گرم در گرم وزن خشک بود. این نتیجه حاکی از آن است که تحت شرایط تنش متوسط آبی، کاربرد دو مرحله سیلیکات‌پتاسیم می‌تواند بیش‌ترین پتانسیل سنتز یا تجمع پروتئین‌های محلول را در رقم کورسیکا فعال سازد. تیمارهای یک‌بار محلول‌پاشی و شاهد برای رقم کورسیکا در شرایط آبیاری ۱۰ روزه نیز به‌طور مشترک در رتبه دوم آماری قرار گرفتند (به‌ترتیب با ۱۳/۴۷ و ۱۳/۲۰ میلی‌گرم) که نشان از واکنش مثبت و تدریجی این رقم به کاربرد سیلیکات‌پتاسیم در شرایط کاهش ملایم رطوبت خاک دارد (جدول ۳). در ارقام دیگر، مانند ووگ و سانته، بیش‌ترین مقدار پروتئین محلول به‌طور عمده در شرایط آبیاری هفت روز یک‌بار مشاهده شد و به‌ترتیب تیمار دو بار محلول‌پاشی در رقم ووگ (۱۱/۲۲ میلی‌گرم) و تیمار دو بار محلول‌پاشی در رقم سانته (۹/۹۷ میلی‌گرم) بیش‌ترین مقادیر را در بین ترکیب‌های مربوط به این دو رقم داشتند. درحالی‌که این مقادیر کم‌تر از مقادیر مشاهده‌شده در رقم کورسیکا تحت آبیاری ۱۰ روزه بودند (جدول ۳) که از واکنش نسبی این ارقام به تنش کم‌تر آبی و کاربرد سیلیکات‌پتاسیم حمایت دارند. به‌طور کلی، داده‌ها نشان می‌دهند که رقم کورسیکا نه‌تنها از نظر مطلق بالاترین میزان پروتئین محلول را تولید کرده، بلکه حساسیت و پاسخ‌پذیری مطلوب‌تری نیز نسبت به شرایط تنش متوسط آبیاری و کاربرد سیلیکات‌پتاسیم داشته است. در مقابل، ارقام ووگ و سانته عملکرد بهتری را در شرایط آبیاری کامل‌تر (هفت روز یک‌بار) نشان دادند که ممکن است به تفاوت‌های ژنتیکی در مکانیسم‌های جذب عناصر، تنظیم اسمزی و سنتز ترکیبات سازگارکننده در پاسخ به تنش رطوبتی مرتبط باشد. این نتایج بر اهمیت انتخاب رقم و مدیریت هم‌زمان آب و عناصر تقویتی برای بهبود صفات کیفی سیب‌زمینی تأکید دارد.

۴.۴. کربوهیدرات‌های کل

نتایج حاصل از بررسی کربوهیدرات کل سیب‌زمینی نشان داد که این صفت به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده (در سطح احتمال ۵ درصد) و برهم‌کنش رژیم آبیاری، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم و رقم (در سطح احتمال ۵ درصد) قرار گرفت (جدول ۲). برای ارقام ووگ و سائته، بیش‌ترین میزان کربوهیدرات کل به‌طور عمده در شرایط آبیاری هفت روز یک‌بار مشاهده شد. به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار کربوهیدرات محلول در رقم ووگ ($16/97$ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) و رقم سائته ($16/62$ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) در شرایط بدون تنش آبی و تیمار دوبار محلول‌پاشی مشاهده شد. با این وجود، این مقادیر از رقم کورسیکا تحت تنش متوسط خشکی، کم‌تر بود. به‌طوری‌که در مجموع بیش‌ترین مقدار کربوهیدرات کل ($19/98$ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) در شرایط آبیاری ۱۰ روز یک‌بار، محلول‌پاشی دو مرحله‌ای سیلیکات‌پتاسیم و در رقم کورسیکا مشاهده شد (جدول ۳). هم‌چنین در شرایط مشابه آبیاری (۱۰ روز یک‌بار)، تیمار یک‌بار محلول‌پاشی در رقم کورسیکا نیز با مقدار $21/12$ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک، در رتبه دوم آماری قرار گرفت (جدول ۳). این یافته‌ها نشان می‌دهد که تحت شرایط تنش متوسط کم آبی، کاربرد دو بار محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم به‌طور قابل‌توجهی موجب افزایش کربوهیدرات‌ها در این رقم می‌شود (جدول ۳). به‌طور کلی داده‌ها حاکی از آن است که رقم کورسیکا با واکنش بهتر نسبت به تنش آبی و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم، توانایی بیش‌تری در تجمع کربوهیدرات کل داشته است که این ویژگی احتمالاً می‌تواند نقش مهمی در افزایش تحمل به کم آبی و حفظ عملکرد در این رقم ایفا کند.

۴.۵. پرولین

نتایج حاصل از بررسی تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم و ارقام مختلف سیب‌زمینی بر تجمع پرولین نشان داد که اثرات اصلی، متقابل دوگانه و سه‌گانه تیمارها بر این شاخص فیزیولوژیک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۲). در بررسی میانگین داده‌ها، بیش‌ترین میزان پرولین به رژیم آبیاری ۱۳ روز یک‌بار بدون محلول‌پاشی در رقم سائته اختصاص یافت که با میانگین $53/69$ میکرومول بر گرم وزن تر برگ، بالاتر از سایر ترکیب‌های تیماری بود. هم‌چنین، در شرایط مشابه، ارقام کورسیکا و ووگ به‌ترتیب میانگین‌های $34/54$ و $38/72$ میکرومول بر گرم را نشان دادند که از نظر آماری نیز در سطح بالایی قرار داشتند (جدول ۳). با کاهش شدت تنش آبی و افزایش دفعات آبیاری، میزان پرولین کاهش یافت، به‌طوری‌که در رژیم آبیاری هفت روز یک‌بار، مقدار پرولین به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در این شرایط، تیمار دو بار محلول‌پاشی در رقم کورسیکا با میانگین $6/55$ میکرومول بر گرم، کم‌ترین میزان پرولین را داشت (جدول ۳). اثر کاهنده محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم بر تجمع پرولین در اغلب تیمارها مشاهده شد، به‌ویژه در شرایط تنش متوسط، محلول‌پاشی موجب کاهش معنی‌دار پرولین نسبت به تیمارهای شاهد گردید. به‌طوری‌که، در رژیم آبیاری ۱۰ روز یک‌بار، میانگین پرولین در رقم کورسیکا از $16/73$ میکرومول در تیمار شاهد به $13/75$ میکرومول در تیمار دو بار محلول‌پاشی کاهش یافت (جدول ۳). در بین ارقام موردبررسی، رقم سائته در تمامی سطوح آبیاری و محلول‌پاشی دارای بیش‌ترین میانگین پرولین بود (جدول ۳) و به‌نظر می‌رسد از نظر فیزیولوژیک حساس‌تر به تنش آبی بوده و پاسخ تنظیمی بیش‌تری از طریق سنتز پرولین نشان داده است. در مقابل، رقم کورسیکا در اکثر ترکیب‌های تیماری دارای کم‌ترین میزان پرولین بود (جدول ۳) که می‌تواند ناشی از ویژگی‌های ذاتی در تحمل به تنش و کارایی جذب آب باشد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی موجب تحریک تجمع پرولین به‌عنوان ترکیب تنظیم‌کننده اسمزی شده و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم با بهبود وضعیت فیزیولوژیک گیاه، نقش مؤثری در کاهش نیاز به تنظیم اسمزی ایفا کرده است. از سوی دیگر، تفاوت میان ارقام از نظر میزان پرولین نیز نشان‌دهنده تفاوت‌های ژنتیکی در سازوکارهای فیزیولوژیک پاسخ به تنش آبی است که باید در برنامه‌های اصلاحی و مدیریتی مدنظر قرار گیرد.

۴.۶. مالون‌دی‌آلدهید

مقادیر مالون‌دی‌آلدهید سیب‌زمینی تحت تأثیر اثرات سه‌گانه رژیم آبیاری، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم و رقم‌ها به صورت معنی‌داری (در سطح احتمال ۱ درصد) تغییر کردند (جدول ۲). به طور مشخص، در رژیم آبیاری با فاصله ۱۳ روز یک‌بار و بدون محلول‌پاشی، رقم سائنه بیش‌ترین مقدار مالون‌دی‌آلدهید را با میانگین حدود ۲۵/۱۴ نانومول بر گرم وزن تازه نشان داد (جدول ۳) که بیانگر بیش‌ترین آسیب اکسیداتیو در شرایط شدید کم‌آبی است. این مقدار در مقایسه با رقم کورسیکا تحت همان شرایط که میانگین مالون‌دی‌آلدهید آن حدود ۱۶/۶۸ نانومول بر گرم بود (جدول ۳)، به‌طور معنی‌داری بالاتر بود. در مقابل، محلول‌پاشی دو بار سیلیکات‌پتاسیم در آبیاری هفت روز یک‌بار برای رقم کورسیکا موجب کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدهید به حدود ۳/۰۲ نانومول بر گرم وزن تازه شد، همین تیمار مقدار مالون‌دی‌آلدهید برای رقم ووگ و رقم سائنه را نیز به‌ترتیب تا حدود ۴/۲۳ و ۵/۷۱ نانومول بر گرم کاهش داد (جدول ۳). این کاهش‌ها نشان‌دهنده تأثیر محافظتی محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم در کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود پایداری غشاهای هستند که حتی در شرایط کم‌تر تنش، پاسخ ارقام مختلف به محلول‌پاشی و آبیاری متفاوت است. بنابراین، این نتایج بر نقش تعاملی مهم بین مدیریت آبیاری، استفاده از سیلیکات‌پتاسیم و ژنتیک رقم در کاهش تنش‌های اکسیداتیو و بهبود مقاومت به کم‌آبی تأکید می‌کند.

۴.۷. نتایج همبستگی

نتایج تحلیل همبستگی صفات (جدول ۴) نشان داد که عملکرد غده سیب‌زمینی با شاخص‌های فیزیولوژیک ارتباط مثبت و معنی‌داری داشت. عملکرد غده با کلروفیل، پروتئین محلول و کربوهیدرات کل همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد، که بیانگر نقش مستقیم این شاخص‌ها در افزایش توان فتوسنتزی و تأمین مواد متابولیکی لازم برای رشد غده بود. گیاهانی که توانایی حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی و سنتز پروتئین بالاتری داشتند، ظرفیت بیش‌تری برای تولید کربوهیدرات و در نهایت عملکرد بالاتر غده نشان دادند. از سوی دیگر، شاخص‌های پرولین و مالون‌دی‌آلدهید همبستگی منفی و معنی‌داری با عملکرد داشتند که افزایش این شاخص‌ها منعکس‌کننده تنش اکسیداتیو و آسیب به غشاهای سلولی بود و کاهش عملکرد را به دنبال داشت. روابط بین صفات فیزیولوژیک نیز نشان داد که سازوکارهای پاسخ گیاه هماهنگ بودند؛ کلروفیل با پروتئین محلول و کربوهیدرات کل همبستگی مثبت داشت که نشان می‌داد حفظ کلروفیل نه تنها موجب پایداری فتوسنتز می‌شد، بلکه سنتز پروتئین و تولید کربوهیدرات را نیز بهبود می‌بخشید و در نهایت ارتقای عملکرد را به دنبال داشت. از طرفی همبستگی مثبت بین عملکرد و این شاخص‌ها نشان می‌دهد که افزایش عملکرد صرفاً ناشی از دریافت آب بیش‌تر یا کاربرد کود نبوده، بلکه حاصل فعال‌شدن سازوکارهای فیزیولوژیک ویژه در این رقم است. پرولین و مالون‌دی‌آلدهید نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری با یکدیگر داشتند که بیانگر این بود که تجمع اسمولیت سازگار همراه با افزایش پراکسیداسیون لیپیدی رخ داده و هر دو شاخص شدت استرس خشکی را منعکس می‌کردند. افزایش این دو شاخص در شرایط خشکی شدید با کاهش هم‌زمان عملکرد و سایر شاخص‌های فیزیولوژیک همخوانی داشت. به عبارت دیگر، تحلیل همبستگی نشان داد که سیلیکات‌پتاسیم با تقویت صفات فیزیولوژیک مثبت و کاهش شاخص‌های تنش، اثرات منفی خشکی را تعدیل کرده و افزایش عملکرد غده در گیاهان تیمار شده ناشی از افزایش کلروفیل، پروتئین محلول و کربوهیدرات کل و هم‌زمان کاهش پرولین و مالون‌دی‌آلدهید بود که رابطه علت و معلولی معنی‌داری بین تعدیل فیزیولوژیک و ارتقای عملکرد غده ارائه داد. از طرفی، رقم کورسیکا در اغلب تیمارها پایین‌ترین مقدار پرولین و مالون‌دی‌آلدهید را داشت، به‌ویژه در تیمار دو بار محلول‌پاشی، میزان مالون‌دی‌آلدهید در آن به حداقل

رسید. این امر نشان‌دهنده کاهش آسیب اکسیداتیو و کارایی بیش‌تر سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی در این رقم است. وجود همبستگی منفی بین مالون‌دی‌آلدهید و عملکرد نیز نقش سیلیکات‌پتاسیم را در کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و حفظ پایداری غشاها تأیید می‌کند. بنابراین، آنچه در ظاهر می‌تواند بدیهی تلقی شود (افزایش عملکرد در تیمارهای بهینه)، در واقع حاصل یک تعامل پیچیده بین مدیریت آب، تغذیه برگی، و ویژگی‌های ژنتیکی رقم است. همبستگی بین عملکرد و صفاتی مانند کلروفیل، پروتئین محلول، کربوهیدرات کل، پرولین و مالون‌دی‌آلدهید در مجموع نشان می‌دهد که افزایش عملکرد به‌واسطه کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود سازگاری متابولیکی رخ داده است، نه صرفاً به‌دلیل افزایش آب یا کود.

جدول ۴. ضریب همبستگی پیرسون بین عملکرد غده و صفات فیزیولوژیک سیب‌زمینی تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم

صفت	عملکرد	کلروفیل	پروتئین محلول	کربوهیدرات کل	پرولین	مالون دی‌آلدهید
عملکرد	۱	۰/۷۱**	۰/۶۸**	۰/۷۴**	-۰/۸۲**	-۰/۷۹**
کلروفیل		۱	۰/۶۵**	۰/۶۹**	-۰/۷۶**	-۰/۷۳**
پروتئین محلول			۱	۰/۶۷**	-۰/۷۰**	-۰/۶۸**
کربوهیدرات کل				۱	-۰/۷۷**	-۰/۷۴**
پرولین					۱	۰/۸۵**
مالون دی‌آلدهید						۱

*, ** و *** به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

۵. بحث

کاهش رطوبت خاک باعث کاهش پتانسیل آب در اطراف ریشه، محدود شدن جذب آب، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش نرخ فتوسنتز خالص، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و در نهایت کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به غده‌ها می‌شود (ال‌شارکوی و همکاران، ۲۰۲۳). در این شرایط، افزایش فاصله آبیاری به‌ویژه تا ۱۳ روز، با کاهش شدید عملکرد همراه شد که نشان‌دهنده بروز تنش خشکی مؤثر بر ساختار و عملکرد اندام‌های منبع (برگ‌ها) و مخزن (غده‌ها) است. در تمام سطوح آبیاری، تیمارهای شاهد عملکرد غده پایین‌تری نسبت به محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم نشان دادند و بیش‌ترین افزایش عملکرد در دو نوبت محلول‌پاشی رقم کورسیکا مشاهده شد، به‌طوری‌که دو نوبت محلول‌پاشی در این رقم تحت تنش ملایم خشکی (آبیاری هر ۱۰ روز یک‌بار) حتی از دو نوبت محلول‌پاشی در سایر ارقام تحت شرایط بدون تنش عملکرد بالاتری ایجاد کرد که توان فیزیولوژیک بالای کورسیکا و توجیه اقتصادی قوی اجرای این تیمار را نشان می‌دهد. تیمار یک نوبت محلول‌پاشی نیز موجب افزایش عملکرد شد، اما میزان آن نسبت به دو نوبت کم‌تر بود. ارقام حساس‌تر مانند سانه در تیمار شاهد کاهش عملکرد قابل‌توجهی داشتند. بنابراین، ترکیب مدیریت فاصله آبیاری با دو نوبت محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم، به‌ویژه در رقم کورسیکا، ضمن حفظ عملکرد و شاخص‌های فیزیولوژیک، از منظر اقتصادی نیز منطقی و قابل‌توصیه است. از طرفی تحلیل همبستگی صفات در پژوهش حاضر نشان داد که افزایش عملکرد غده با تقویت صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک کلیدی ارتباط مستقیم دارد. به‌ویژه، حفظ مقادیر بالای کلروفیل و پروتئین محلول موجب تقویت ظرفیت فتوسنتزی برگ‌ها و افزایش تولید و انتقال کربوهیدرات به غده‌ها شد. این روند رابطه‌ای علت‌مند بین پایداری فتوسنتز و تأمین منابع متابولیکی غده‌ها ایجاد می‌کند. در مقابل، افزایش پرولین و مالون‌دی‌آلدهید نشانگر افزایش تنش اکسیداتیو و آسیب غشایی بود که محدودیت جذب و انتقال مواد به اندام‌های ذخیره‌ای را به‌دنبال داشت و عملکرد غده را کاهش داد. با توجه به ضرایب همبستگی مثبت کلروفیل، پروتئین محلول و کربوهیدرات کل با عملکرد، مشخص شد که توانایی گیاه در حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی و سنتز پروتئین نه‌تنها مقاومت

به خشکی را تقویت می‌کند، بلکه به‌طور مستقیم با افزایش تولید غده مرتبط است (آزاب و همکاران، ۲۰۲۳). هم‌چنین همبستگی منفی پرولین و مالون‌دی‌آلدهید با عملکرد، نشان داد که کاهش آسیب اکسیداتیو و تنش اسمزی توسط محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم عامل مهمی در بهبود عملکرد بود. به‌طور خاص، در رقم کورسیکا که توانایی بالاتری در حفظ کلروفیل و تولید پروتئین و کربوهیدرات داشت، محلول‌پاشی دو نوبته موجب تقویت اثرات مثبت فیزیولوژیک شد و عملکرد آن حتی در شرایط محدودیت آبی متوسط از سایر ارقام در شرایط بدون تنش پیشی گرفت. این یافته نشان می‌دهد که ترکیب مدیریت تغذیه‌ای و ظرفیت ذاتی رقم، رابطه‌ای مستقیم و علت‌مند با عملکرد غده ایجاد می‌کند. تفاوت بین حداکثر و حداقل عملکرد ثبت‌شده (حدود ۲۹ تن در هکتار) به‌وضوح نشان می‌دهد که چگونگی ترکیب عوامل مدیریتی و ژنتیکی، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهره‌وری سیستم زراعی سیب‌زمینی دارد. از این‌رو، استفاده هم‌زمان از تیمار تغذیه‌ای مکمل مانند سیلیکات پتاسیم و انتخاب ارقام با پتانسیل بالاتر سازگاری به تنش، می‌تواند یک راهبرد پایدار برای افزایش عملکرد در مناطق مستعد کم‌آبی باشد. این یافته‌ها هم‌چنین گواه بر اهمیت تنظیم دقیق زمان و دفعات محلول‌پاشی در راستای هم‌پوشانی با مراحل حساس فنولوژیک گیاه هستند.

روابط میان کلروفیل با پروتئین محلول و کربوهیدرات کل نشان‌دهنده همبستگی مثبت و معنی‌دار است. این ارتباط مثبت نشان می‌دهد که افزایش محتوای کلروفیل می‌تواند به بهبود سنتز پروتئین و تولید کربوهیدرات در گیاه منجر شود، که به‌نوبه خود می‌تواند به ارتقای عملکرد غده کمک کند. از سوی دیگر، همبستگی منفی و معنی‌دار میان کلروفیل و شاخص‌های پرولین و مالون‌دی‌آلدهید نشان‌دهنده این است که افزایش محتوای کلروفیل می‌تواند با کاهش تنش‌های اکسیداتیو و آسیب به غشاهای سلولی همراه باشد. این امر می‌تواند به حفظ پایداری ساختارهای سلولی و بهبود عملکرد فتوسنتزی گیاه کمک کند. افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل در تیمار دو بار محلول‌پاشی، به‌ویژه در سطوح شدید تنش آبی، نشان‌دهنده تأثیر تجمعی و پایدارتر سیلیکات پتاسیم در تعدیل اثرات سوء تنش خشکی است. در واقع، تکرار محلول‌پاشی در مراحل کلیدی رشد (۴۰ و ۸۰ روز پس از کاشت) به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شده بود که در دوره‌های بحرانی رشد که نیاز گیاه به پایداری فیزیولوژیک بالاتر است، از برگ‌ها محافظت شود. از سوی دیگر، برتری رقم کورسیکا در حفظ مقدار بالای کلروفیل را می‌توان به ویژگی‌های ژنتیکی این رقم نسبت داد. به‌نظر می‌رسد کورسیکا دارای سامانه‌های مؤثرتر در تنظیم اسمز سلولی، سنتز متابولیت‌های سازگار (مانند پرولین) و یا احتمالاً کارایی بالاتر در استفاده از سیلیکات پتاسیم باشد. در نهایت، قابل‌توجه است که افزایش محتوای کلروفیل به‌طور مستقیم با حفظ توان فتوسنتزی و عملکرد زراعی گیاه در ارتباط است (فهاد و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، نتایج این مطالعه مبین آن است که کاربرد سیلیکات پتاسیم، به‌ویژه در دو نوبت، در کنار انتخاب رقم مقاوم‌تر مانند کورسیکا، راهبرد مؤثری برای حفظ عملکرد فیزیولوژیک سیب‌زمینی در مناطق کم‌آب محسوب می‌شود.

در پژوهش حاضر، پروتئین محلول با کلروفیل و کربوهیدرات کل همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد، به‌طوری‌که افزایش سطح این شاخص‌ها با افزایش پروتئین محلول هم‌زمان بوده است. این ارتباط علت و معلولی می‌تواند ناشی از نقش پروتئین‌های محلول در حفظ ظرفیت فتوسنتزی و تأمین پیش‌سازهای متابولیکی برای سنتز کربوهیدرات باشد. گزارش‌ها نیز نشان می‌دهد که در تنش آبی متوسط، سنتز ترکیباتی نظیر پروتئین‌های محلول به‌عنوان بخشی از پاسخ اسمولیتی گیاه فعال می‌شود (هوانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). در بین ارقام، کورسیکا بیش‌ترین تأثیرپذیری مثبت به محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم را نشان داد، به‌طوری‌که در آبیاری هر ۱۰ روز یک‌بار و دو بار محلول‌پاشی، بالاترین مقدار پروتئین محلول ثبت شد. این نتیجه با همبستگی مثبت پروتئین با کلروفیل و کربوهیدرات کل همخوانی دارد و نشان

می‌دهد که توان ذاتی این رقم در حفظ عملکرد فتوسنتزی و جذب عناصر، باعث بهره‌وری بالاتر مکانیسم‌های سنتز پروتئین می‌شود. در مقابل، ارقام ووگ و سانه در شرایط تنش ملایم کم‌تر از کورسیکا به افزایش پروتئین پاسخ دادند که می‌تواند ناشی از محدودیت توان ذاتی آن‌ها در هم‌زمان کردن سنتز پروتئین با حفظ کلروفیل و تولید کربوهیدرات باشد. بنابراین به‌نظر می‌رسد اعمال یک سطح متوسط تنش آبی در قالب آبیاری هر ۱۰ روز یک‌بار منجر به تحریک سازوکارهای فیزیولوژیکی نظیر تنظیم اسمزی و سنتز ترکیبات حفاظتی از جمله پروتئین‌های محلول شده است، به‌گونه‌ای که افزایش این ترکیبات احتمالاً به حفظ تعادل اسمزی و پایداری ساختار سلولی در شرایط تنش کمک کرده است. برتری رقم کورسیکا در این شرایط نیز احتمالاً به‌واسطه توان ذاتی بیش‌تر آن در حفظ ظرفیت فتوسنتزی، کارایی مصرف آب و توانایی استفاده مؤثرتر از سیلیکون برای فعال‌سازی مکانیسم‌های سازگاری بوده است. هم‌چنین همبستگی منفی پروتئین محلول با پرولین و مالون‌دی‌آلدهید نشان داد که در شرایط تنش شدید آبی، افزایش پراکسیداسیون لیپیدی و تجمع اسمولیت‌های سازگار، با کاهش سنتز پروتئین محلول همراه است. این پدیده علت و معلولی، نقش تنش اکسیداتیو و محدودیت منابع متابولیکی را در کاهش ظرفیت تولید پروتئین محلول برجسته می‌کند. بنابراین، افزایش پروتئین محلول در تیمارهای محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم، به‌ویژه در رقم کورسیکا و در شرایط تنش متوسط، ناشی از توانایی گیاه در حفظ کلروفیل و تولید کربوهیدرات کافی برای پشتیبانی از مسیرهای سنتز پروتئین و تنظیم اسمزی سلولی است. به‌طورکلی، نتایج بیانگر آن است که استفاده تلفیقی از تنش ملایم آبی و محلول‌پاشی مناسب سیلیکات‌پتاسیم، به‌ویژه در رقم دارای سازگاری بالاتر، می‌تواند با تحریک مسیرهای بیوشیمیایی تنظیمی، به افزایش محتوای پروتئین محلول غده در شرایط تنش منجر شود. در شرایط تنش کم‌آبی، توانایی گیاه در حفظ فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های ذخیره‌ای مانند غده‌ها به‌شدت کاهش می‌یابد. کاهش دسترسی به آب منجر به بسته‌شدن روزنه‌ها می‌شود که در نتیجه آن، جذب CO_2 محدود شده و عملکرد فتوسنتز مختل می‌گردد. این شرایط معمولاً به کاهش تولید قندها و در نهایت کاهش انباشت کربوهیدرات‌ها در غده منجر می‌شود (ال‌شارکاوی و همکاران، ۲۰۲۳). اما در پژوهش حاضر، در شرایط تنش متوسط، رقم کورسیکا توانست مقادیر بیش‌تری از کربوهیدرات کل را انباشت کند که این موضوع می‌تواند بیانگر نقش مؤثرتر مکانیسم‌های فیزیولوژیک رقم کورسیکا در تعدیل آثار محدودیت رطوبت باشد. چراکه براساس نتایج همبستگی صفات، کربوهیدرات کل ارتباط مثبت و معنی‌داری با کلروفیل و پروتئین محلول داشته است، بنابراین می‌توان استنباط کرد که در این رقم، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم با حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی و پایداری سنتز پروتئین، بستر لازم برای تداوم تولید و ذخیره کربوهیدرات را فراهم کرده است. در عین‌حال، همبستگی منفی کربوهیدرات با شاخص‌های تنش نظیر پرولین و مالون‌دی‌آلدهید نشان می‌دهد که تجمع بالاتر کربوهیدرات در کورسیکا احتمالاً ناشی از کاهش شدت تنش اکسیداتیو تحت تأثیر سیلیکات بوده است. این مجموعه روابط می‌تواند توضیح دهد که چرا در سطح تنش متوسط، کورسیکا عملکرد بهتری در ذخیره کربوهیدرات کل نشان داده و نقش سیلیکات در تقویت سازوکارهای فیزیولوژیک حمایتی در این رقم برجسته‌تر بوده است. از نظر زمان‌بندی نیز، وقوع حداکثر تولید کربوهیدرات در تیمار آبیاری ۱۰ روز یک‌بار قابل‌توجه است. این رژیم آبیاری احتمالاً حد تعادل بین تنش خفیف (که منجر به تحریک برخی مسیرهای متابولیکی و تحریک برداشت مؤثرتر آب و عناصر از خاک می‌شود (نصیر^۱ و همکاران، ۲۰۲۲) و تنش شدید (که موجب افت فتوسنتز و تجزیه منابع ذخیره‌ای می‌شود (زاکی و همکاران، ۲۰۲۱)) را فراهم کرده است. در چنین شرایطی، نقش سیلیکات‌پتاسیم به‌عنوان مکمل غذایی و فیزیولوژیکی، بهتر بروز یافته و تأثیر مثبت آن در حفظ عملکرد فتوسنتز، انتقال کربوهیدرات‌ها و افزایش ذخیره‌سازی در غده بیش‌تر مشاهده شده است.

به‌طور کلی، برتری رقم کورسیکا را می‌توان حاصل تعامل بین سه عامل دانست؛ حفظ نسبی کلروفیل و ظرفیت فتوسنتزی، کاهش شدت استرس اکسیداتیو و بهبود فرایند انتقال متابولیت‌ها. این عوامل به‌صورت هم‌زمان زمینه‌ساز تجمع بالاتر کربوهیدرات‌ها در این رقم تحت تنش متوسط شده‌اند.

در این پژوهش، پرولین به‌طور مستقیم تحت تأثیر شدت خشکی قرار گرفت و با افزایش فاصله آبیاری، میزان آن در گیاه افزایش یافت. با این حال، میزان و الگوی پاسخ بین ارقام متفاوت بود؛ رقم سانه در تمام تیمارها بالاترین سطوح پرولین را داشت که بیانگر حساسیت بیش‌تر آن به تنش و نیاز شدیدتر به تعدیل اسمزی بود. در مقابل، رقم کورسیکا حتی در شرایط تنش متوسط (آبیاری ۱۰ روزه) با مقادیر پایین‌تری از پرولین همراه شد و این امر می‌تواند بازتابی از توانایی ذاتی آن در حفظ وضعیت آبی و محدود کردن نیاز به تجمع اسمولیت‌ها باشد. بنابراین، مشاهده افزایش پرولین در تیمارهای کم‌آبی شدید، از جمله در رقم سانه، انعکاسی از سازوکار حفاظتی گیاه برای مقابله با تنش است. تفاوت میان ارقام از نظر میزان پرولین نیز به تفاوت‌های ژنتیکی در مسیرهای تنظیم اسمزی بازمی‌گردد. رقم سانه با تجمع پرولین بیش‌تر، احتمالاً به‌دلیل حساسیت بیش‌تر به تنش آبی، پاسخ تنظیمی شدیدتری را از طریق بیوسنتز پرولین نشان می‌دهد. در مقابل، رقم کورسیکا که در بیش‌تر تیمارها محتوای پرولین پایین‌تری داشت، ممکن است دارای ویژگی‌هایی چون ریشه‌های عمیق‌تر، توان جذب آب بیش‌تر یا کارایی مصرف آب بالاتر باشد که نیاز به پاسخ اسمزی شدید را کاهش می‌دهد (زاک و همکاران، ۲۰۲۱). از طرفی پرولین با عملکرد غده همبستگی منفی و معنی‌داری داشت. این رابطه نشان می‌دهد که افزایش پرولین بیش‌تر نقش شاخص تنش را دارد تا مکانیزمی مؤثر بر افزایش عملکرد. در واقع، در رقم کورسیکا که سطح پرولین پایین‌تری داشت، هم‌زمان مقادیر بالاتری از کلروفیل و کربوهیدرات کل ثبت شد و عملکرد نیز حفظ گردید. همبستگی مثبت پرولین با مالون‌دی‌آلدهید نیز بیانگر آن است که افزایش پرولین غالباً با افزایش شدت آسیب اکسیداتیو همراه بوده و در شرایطی که سیلیکات توانست هر دو شاخص را کاهش دهد، کارایی فیزیولوژیک گیاه بهبود یافته است. به‌طوری‌که کاربرد سیلیکات پتاسیم تقریباً در تمامی شرایط موجب کاهش معنی‌دار پرولین شد. و این اثر در رقم کورسیکا بارزتر بود و در شرایط تنش متوسط، کاهش پرولین در تیمار دو بار محلول‌پاشی نسبت به شاهد مشهود بود. چنین الگویی نشان می‌دهد که سیلیکات با تقویت پایداری غشا و کاهش فرایندهای پراکسیداسیون لیپیدی، نیاز گیاه به سنتز پرولین را کم‌تر کرده است. در شرایط کم‌آبی شدید، گیاهان تحت استرس آبی قرار می‌گیرند که منجر به کاهش کارکرد طبیعی غشاهای سلولی و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. این افزایش باعث پراکسیداسیون لیپیدهای غشا و افزایش مالون‌دی‌آلدهید می‌گردد (سلیمان و همکاران، ۲۰۲۱). در این پژوهش همبستگی منفی و معنی‌دار مالون‌دی‌آلدهید با عملکرد نشان می‌دهد که افزایش پراکسیداسیون لیپیدی به‌طور هم‌زمان با کاهش توان فتوسنتزی و محدودیت در تولید و انتقال کربوهیدرات همراه بوده است. به بیان دیگر، ارقامی که مقادیر بالاتری از مالون‌دی‌آلدهید داشتند، مانند سانه، در عمل با کاهش ظرفیت تولید ماده خشک و افت عملکرد مواجه شدند. در مقابل، مقادیر پایین‌تر مالون‌دی‌آلدهید در رقم کورسیکا نه‌تنها نشان‌دهنده مقاومت بیش‌تر غشاها به تنش بود، بلکه هم‌زمان با افزایش تجمع کربوهیدرات و حفظ پروتئین‌های محلول، شرایط بهتری برای انتقال مواد فتوسنتزی به غده فراهم کرد. بنابراین، تفاوت ارقام از منظر مالون‌دی‌آلدهید را می‌توان به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در تبیین اختلاف در کارایی مصرف آب و توانایی حفظ عملکرد در شرایط تنش دانست. هم‌چنین تفاوت رقم‌ها در واکنش به محلول‌پاشی نشان داد که اثربخشی سیلیکات وابسته به ظرفیت ژنتیکی ارقام در فعال‌سازی سازوکارهای دفاعی است. از سوی دیگر، تفاوت عملکرد ارقام می‌تواند به تفاوت‌های ژنتیکی و فیزیولوژیکی آن‌ها بازگردد، به‌طوری‌که برخی ارقام توانایی بیش‌تری در حفظ تعادل اسمزی، فعالیت بهتر سیستم‌های دفاعی و تثبیت ساختار غشاها در شرایط تنش دارند. این ویژگی‌ها باعث کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و کاهش مالون‌دی‌آلدهید می‌شوند (محمود و همکاران، ۲۰۲۱). در مجموع، این نتایج حاکی از آن است که برتری نسبی رقم کورسیکا در

کاهش مالون‌دی‌آلدئید به‌ویژه تحت محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم می‌تواند بخشی از توضیح چرایی مقاومت بیش‌تر آن در شرایط تنش متوسط و حفظ بهتر کارایی فیزیولوژیک باشد. از سوی دیگر، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم در کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید نقش بارزی ایفا کرد، به‌ویژه در تیمار آبیاری هفت روز یک‌بار که بیش‌ترین کاهش در رقم کورسیکا مشاهده شد. این امر بیانگر آن است که حضور سیلیکات می‌تواند با تقویت مکانیسم‌های دفاعی و کاهش آسیب اکسیداتیو، پایداری غشاها را بهبود بخشد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش به روشنی نشان داد که کاربرد سیلیکات‌پتاسیم به‌ویژه به‌صورت محلول‌پاشی دو مرحله‌ای، تأثیر معنی‌داری در بهبود عملکرد زراعی و شاخص‌های فیزیولوژیک سیب‌زمینی تحت تنش کم‌آبی دارد. در میان ارقام مورد بررسی، رقم کورسیکا با داشتن بیش‌ترین پتانسیل در حفظ محتوای کلروفیل، افزایش کربوهیدرات کل و پروتئین محلول و کاهش مالون‌دی‌آلدئید و پرولین، عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به ارقام ووگ و سانتا از خود نشان داد. این رقم نه‌تنها تحت شرایط بهینه، بلکه در شرایط تنش متوسط و شدید آبی نیز توانست با واکنش مثبت به محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم، سطوح بالاتری از عملکرد و شاخص‌های فیزیولوژیک را حفظ کند. از سوی دیگر، رقم سانتا به‌عنوان حساس‌ترین رقم به تنش آبی شناسایی شد و در اغلب شاخص‌ها مانند افزایش پرولین و MDA، نشانه‌هایی از آسیب‌پذیری فیزیولوژیک بیش‌تری را بروز داد. نتایج بیانگر آن بود که اثرات محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم در شرایط تنش آبی بیش‌تر از شرایط بهینه بروز می‌یابد و این ترکیب می‌تواند نقش مهمی در بهبود تحمل به خشکی، حفظ ساختار غشا، کاهش استرس اکسیداتیو و ارتقای کیفیت فیزیولوژیک ایفا کند. بنابراین، به‌نظر می‌رسد در مناطقی با محدودیت منابع آبی، استفاده تلفیقی از مدیریت آبیاری بهینه (نظیر آبیاری ۱۰ روز یک‌بار)، همراه با محلول‌پاشی دو نوبته سیلیکات‌پتاسیم، به‌ویژه در رقم‌هایی با پتانسیل عملکردی بالا مانند کورسیکا می‌تواند در اولویت قرار گیرد. هم‌چنین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، بررسی‌های مولکولی جهت تبیین دقیق‌تر سازوکارهای پاسخ فیزیولوژیکی به سیلیکات‌پتاسیم در سطوح ژن و پروتئین انجام شده و دامنه پاسخ‌پذیری این ترکیب در سایر محصولات استراتژیک نیز موردبررسی قرار گیرد. افزون بر این، آزمودن اثر ترکیبی سیلیکات‌پتاسیم با دیگر عناصر کم‌مصرف و تنظیم‌کننده‌های رشد در قالب پژوهش‌های مزرعه‌ای گسترده‌تر، می‌تواند به ارائه راهبردهای پایدار در مدیریت تنش آبی کمک کند.

۷. تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه و حمایت ارزشمند مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران در اجرای این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

حسینی، سمانه؛ رفیعی‌الحسینی، محمد و روشن‌دل، پرتو (۱۳۹۷). تأثیر میدان مغناطیسی بر جوانه زنی دان سیاه (*Guizotia abyssinica*) تحت تنش خشکی. *پژوهش‌های بذر ایران*، ۵(۱)، ۳۳-۵۲.

References

- Abdel-Zaher, A., Abd El-Rehim, G. H., Abd Elmotagly, M., & Yousef, A. F. (2023). The use of potassium silicate and fulvic acid to mitigate the effects of heat stress in tomato plants. *Arabian Journal of Agricultural Sciences*, 6(2), 122-140.
- Abou-Sreea, A. I. B., Roby, M. H., Mahdy, H. A., Abdou, N. M., El-Tahan, A. M., El-Saadony, M. T., & El-Saadony, F. M. (2022). Improvement of selected morphological, physiological, and biochemical parameters of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) grown under different salinity levels using potassium silicate and Aloe saponaria extract. *Plants*, 11(4), 497.
- Aminifard, M., Zarchini, A., & Zafari, D. (2014). Effect of potassium silicate on biochemical and physiological characteristics of wheat under drought stress. *Agricultural Water Management*, 141(3), 45-53.
- Arafa, R. A., Youssef, S. M., Abou Hussein, S. D., & El-Keblawy, A. A. (2024). Role of potassium silicate in improving drought tolerance in potato (*Solanum tuberosum* L.): physiological and biochemical insights. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 74 (1), 1-13.
- Arnon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1-15.
- Azab, E. S., Alshallash, K. S., Alqahtani, M. M., Safhi, F. A., ALshamrani, S. M., Ali, M. A., & El-Taher, A. M. (2022). Physiological, anatomical, and agronomic responses of Cucurbita pepo to exogenously sprayed potassium silicate at different concentrations under varying water regimes. *Agronomy*, 12(9), 2155.
- Bahadori, S., Giglou, M. T., Esmailpour, B., Dehdar, B., Estaji, A., Hano, C., & Vita, F. (2023). Antioxidant compounds of potato breeding genotypes and commercial cultivars with yellow, light yellow, and white flesh in Iran. *Plants*, 12(8), 1707.
- Bandurska, H. (2022). Drought stress responses: coping strategy and resistance. *Plants*, 11(7), 922.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39 (1), 205-207.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72 (1-2), 248-254.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28 (3), 350-356.
- El-Feky, F. M., Abd El-Mageed, T. A., & Shalaby, T. A. (2023). Response of eggplant (*Solanum melongena* L.) to potassium silicate application under water deficit. *Plant Archives*, 23 (1), 555-560.
- El-Sharkawy, M., El-Sayed, A., & El-Metwally, M. (2023). Effect of potassium silicate foliar application and water stress by using different amounts of irrigation water supply on potato plants (*Solanum tuberosum* L.). *Egyptian Journal of Chemistry*, 66 (11), 317-326.
- El-Yazied, A. A., Ibrahim, M. F., Ibrahim, M. A., Nasef, I. N., Al-Qahtani, S. M., Al-Harbi, N. A., & Shehata, S. A. (2022). Melatonin mitigates drought induced oxidative stress in potato plants through modulation of osmolytes, sugar metabolism, and ABA homeostasis and antioxidant enzymes. *Plants*, 11(9), 1151.
- Fahad, H. N., Javed, T., & Baloch, A. A. (2021). Potassium-induced drought tolerance of potato by improving morpho-physiological and biochemical attributes. *Agronomy*, 11(12), 2573.
- Gadallah, F. M., Soliman, H. I. A., & Abdalla, M. M. (2022). Physiological responses of two potato cultivars to potassium silicate under drought conditions. *Journal of Plant Production*, 13 (4), 269-277.
- Hafez, E. M., Osman, H. S., El-Razek, U. A. A., Elbagory, M., Omara, A. E. D., Eid, M. A., & Gawayed, S. M. (2021). Foliar-applied potassium silicate coupled with plant growth-promoting rhizobacteria improves growth, physiology, nutrient uptake and productivity of faba bean (*Vicia faba* L.) irrigated with saline water in salt-affected soil. *Plants*, 10(5), 894.
- Heath, R. L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125 (1), 189-198.
- Hosseini, S., Rafiei Alhosseini, M., & Roshandel, P. (2018). Effect of magnetic field on germination of *Guizotia abyssinica* under drought stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 5 (1), 33-52. (In Persian).
- Huang, C., Liao, J., Huang, W., & Qin, N. (2022). Salicylic acid protects sweet potato seedlings from drought stress by mediating abscisic acid-related gene expression and enhancing the antioxidant defense system. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23), 14819.

- Iqbal, M., Bashir, R., Hussain, I., & Mahmood, S. (2025). Enhancing maize (*Zea mays* L.) tolerance to water stress using kaolin and potassium silicate as protective agents. *Cereal Research Communications*, 53(1), 245-259.
- Kandhol, N., Jain, M., & Tripathi, D. K. (2022). Nanoparticles as potential hallmarks of drought stress tolerance in plants. *Physiologia Plantarum*, 174(2), e13665.
- Mahmoud, A. R., El-Khateeb, M. A., & Hamdia, M. A. (2021). Improving water use efficiency and drought tolerance in sweet pepper plants by foliar application of potassium silicate. *Annals of Agricultural Sciences*, 66 (2), 233-241.
- Mohamed, A. A., Osman, M. M., & Saleh, M. E. (2023). Alleviation of drought stress impacts in tomato plants by potassium silicate: growth, biochemical and molecular analysis. *Scientia Horticulturae*, 318, 112082.
- Nasir, M. W., & Toth, Z. (2022). Effect of drought stress on potato production: A review. *Agronomy*, 12(3), 635.
- Oguz, M. C., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I., & Yildiz, M. (2022). Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. *Physiologia*, 2(4), 180-197.
- Qin, L., Zheng, J., Fan, B., Zhou, Y., Diao, R., Sun, Y., & Wang, F. (2024). Analysis of volatile flavour compounds in different potato varieties and regions and the effect of soil elements on starch content. *Food Chemistry*, 24, 102019.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259.
- Shehata, S. A. (2018). Effect of foliar application with potassium silicate and seaweed extract on plant growth, productivity, quality attributes and storability of potato. *Journal of Plant Production*, 9(3), 229-236.
- Shokri Fomeshkenari, M., Ghasemi, K., & Emadi, S. M. (2022). Effect of Various Concentrations of Potassium Silicate on Biomass, Yield and Silicon Distribution in Tomato Plants. *Journal of Vegetables Sciences*, 6(12), 33-46.
- Singh, P., Kumar, V., & Sharma, A. (2023). Interaction of silicon with cell wall components in plants: A review. *Journal of Applied & Natural Science*, 15(2), 9-20.
- Zaki, H. E., & Radwan, K. S. (2022). Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars to drought stress under in vitro and field conditions. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9, 1-19.