University of Tehran Press

Iranian Journal of Horticultural Science

Online ISNN: 2008-482X

Homepage: http:// ijhs.ut.ac.ir/

Physiological and Biochemical Responses of *Physalis peruviana* L. to Salicylic Acid Application under Deficit Water Stress

Sara Siahmansour [1], Abdollah Ehtesham Nia [2]✉, Abdolhossein RezaeiNejad [3]

1. Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: siahmansoursara@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: Ehteshamnia.ab@lu.ac.ir
3. Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: rezaeinejad.hossein@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 20 September 2021

Received: 23 January 2023

Accepted: 14 February 2023

Published online: 21 March 2023

Keywords:

Antioxidant enzymes,

Stomatal index,

Relative water content,

Electrolyte leakage,

Stomatal conductivity.

ABSTRACT

The use of modifiers in drought stress conditions is an optimal and low cost strategy and understanding the different characteristics of the plant in these conditions leads to achieve appropriate production management methods. The main aim of this study was to investigate the role of salicylic acid concentrations (0, 0.5, 1 and 2 mM) in increasing the tolerance of physalis (*Physalis peruviana* L.) to deficit water stress in three levels (control, 85 and 75% of the field capacity), which was done in the form of a factorial experiment based on a completely randomized design with 3 replications. The results showed that deficit water stress reduced relative water content (RWC), gas exchanges and stomatal characteristics in the plant. Deficit water stress also affected the activity of antioxidant enzymes, the amount of electrolyte leakage and malondialdehyde caused the amount of these characteristics to increase. Salicylic acid application in this study, reduced the negative effects of stress. According to the obtained results, the length and width of the stomatal guard cell decreased and the stomatal density enhanced under deficit water stress conditions. The amounts of stomatal conductivity, transpiration, carbon dioxide in stomatal chamber (INT Co2), as well as photosynthesis rate showed a decreasing trend at 85% and 75% of field capacity. The highest photosynthesis rate belonged to foliar application of salicylic acid at concentration of 1 and 2 mM. Hence, for the cultivation of physalis in arid and semi-arid regions, irrigation levels of 95% and 85% of the field capacity along with the application of salicylic acid in concentrations of 1 and 2 mM can be suggested, while the irrigation level of 75% FC is not recommended due to the negative effect on the measured parameters.

Cite this article: Siahmansour, S., Ehtesham Nia, A. & Rezaei Nejad, A. (2023). Physiological and Biochemical Responses of *Physalis peruviana* L. to Salicylic Acid Application under Deficit Water Stress. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 54 (1), 67-83. DOI: http//doi.org/10.22059/IJHS.2023.329083.1964

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/IJHS.2023.329083.1964

Extended Abstract

Introduction

The use of modifiers in drought stress conditions is an optimal and low cost strategy, therefore understanding the different characteristics of the plant in these conditions leads to achieve appropriate production management methods. Drought stress reduces the size and increases the density of leaf stomata, also causes a decrease in stomatal conductivity. In addition to defense systems, which exist in the plant itself, there are other methods to increase the resistance of plants in deficit water stress condition, such as the use of plant growth regulators. Salicylic acid is a phenolic compound and a natural hormone, which is known as one of the common compounds, to decrease the harmful effects of environmental stresses. The purpose of this research was to investigate the physiological and developmental responses as well as the activity of some enzymes of physalis to deficit water and explore the role of salicylic acid in improving the negative effects of water stress.

Materials and Methods

This research was conducted in 2017 in the research greenhouse of Lorestan University, Faculty of Agriculture, located in Khorramabad city, as a factorial experiment based on a completely randomized design. The greenhouse is located at 48 °22 ´E and 33 °29 ´N and at 1125 meters above the sea level. The relative humidity of the greenhouse was 60-90%, the light intensity 600 µmol/m^2/s, the day temperature of the greenhouse 28-30 C° and the night 22-24 C°. The plants were planted at the end of May and two weeks after transplanting were irrigated in 3 levels of field capacity including 95% (control), 85% and 75%. Salicylic acid was applied in four concentrations (0, 0.5, 1 and 2 mM), one week before applying the drought stress. Foliar spraying was done every 10 days. In order to apply drought stress and control the soil moisture, the FC and Permanent Wilting Point were determined using a pressure plate device. All the pots were irrigated in the same way until the 4-leaf stage, when the irrigation treatments were applied.

Results

The results showed that deficit water stress reduced relative water content (RWC), gas exchanges, and changes in stomatal aperture of the plant. Deficit water stress also affected the activity of antioxidant enzymes, the amount of electrolyte leakage and MDA; caused the amounts of these characteristics to increase. Salicylic acid application in this study, reduced the negative effects of water stress. According to the obtained results, in deficit water stress conditions, the length and width of the stomatal guard cells decreased and the stomata density enhanced. Stomatal conductivity, transpiration, carbon dioxide beneath the stomatal chamber (INT Co_2), and photosynthesis rate demonstrated a decreasing trend at 85% and 75% field capacity. The highest photosynthesis rate was due to foliar application of salicylic acid at concentration of 1 and 2 mM. Hence, for the cultivation of physalis in arid and semi-arid regions, irrigation levels of 95% and 85% of the field capacity, along with the application of salicylic acid in concentrations of 1 and 2 mM, can be suggested, while the irrigation level of 75% FC is not recommended, due to the negative effect on the measured parameters.

Discussion

With the decrease in the level of irrigation, the rate of photosynthesis decreases drastically due to the decrease in chlorophyll production and the increase in its decomposition. Salicylic acid increases the rate of photosynthesis and dry matter of the plant by increasing the leaf surface, chlorophyll content, and preventing the ethylene production. Water stress causes the stomatal cells to close and the concentration of carbon dioxide in the leaf mesophyll tissue decreases, consequently NADPH accumulates in the chloroplast. In this case, the amount of available $NADP^+$ to carry out photoreactions reduces and oxygen acts as an electron acceptor. This process leads to the production of superoxide radicals and other reactive oxygen species, which will eventually result in oxidative stress. By changing the activity of catalase, peroxidase and ascorbate peroxidase enzymes, and other enzymes involved in the decomposition of hydrogen peroxide, salicylic acid causes a slight increase in the amount of hydrogen peroxide as a secondary messenger that induces resistance and antioxidant capacity. To induce resistance, only a small amount of hydrogen peroxide is needed, because higher amounts will be a factor in creating oxidative stress.

Conclusion

According to the results, with the reduction of irrigation level and FC, physalis showed a negative reaction to the stress by increasing the activity of antioxidant enzymes and changing stomatal aperture. The use of salicylic acid in water stress conditions improved the studied characteristics compared to the control. Considering the non-significant effects of 95% FC and control irrigation levels and also improving effect of salicylic acid on most studied traits, irrigation levels of 95% and 85% of the field capacity along with the application of salicylic acid in concentrations of 1 and 2 mM can be suggested. Although salicylic acid reduced the effects of stress at the irrigation level of 75%, but this level of irrigation is not recommended due to the negative effects on the measured parameters.

نشریه علوم باغبانی ایران، دوره ۵۴، شماره ۱

انتشارات دانشگاه تهران

شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۷۹۳۰

Homepage: http://ijhs.ut.ac.ir//

پاسخ‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) به محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید تحت تنش کم آبی

سارا سیاه منصور[۱] | عبداله احتشام‌نیا[۲]✉ | عبدالحسین رضایی نژاد[۳]

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: siahmansoursara@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: Ehteshamnia.ab@lu.ac.ir

۳. گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: rezaeinejad.hossein@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، شاخص روزنه‌ای، نشت الکترولیت، هدایت روزنه‌ای.

چکیده

کاربرد مواد تعدیل کننده در شرایط تنش کم‌آبی یک راهبرد بهینه و کم هزینه بوده و شناخت ویژگی‌های مختلف گیاه در این شرایط منجر به اتخاذ شیوه‌های مدیریت تولید مناسب خواهد شد. هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی نقش سالیسیلیک اسید (۰، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌مولار) در افزایش تحمل گیاه فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) به تنش کم‌آبی (کنترل، ۸۵ و ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای) بود که به‌صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملا تصادفی با سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی منجر به کاهش مقدار نسبی آب، تبادلات گازی و ویژگی‌های روزنه‌ای گیاه شد. همچنین تنش کم‌آبی، بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، میزان نشت الکترولیت، مالون‌دی‌آلدئید اثر گذاشت و موجب افزایش این ویژگی‌ها شد. کاربرد سالیسیلیک اسید اثرات منفی تنش کم‌آبی را کاهش داد. طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش، در تنش کم‌آبی، طول و عرض روزنه کاهش و تراکم روزنه افزایش یافت. هدایت روزنه‌ای، تعرق، کربن دی‌اکسید اتاقک زیر روزنه و نرخ فتوسنتز در سطوح آبیاری ۸۵ و ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای کاهش یافت. بالاترین نرخ فتوسنتز متعلق به محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار بود. بنابراین جهت کشت گیاه فیسالیس در مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌توان سطوح آبیاری ۹۵ درصد و ۸۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای را به همراه کاربرد سالیسیلیک اسید در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار پیشنهاد نمود و سطح آبیاری ۷۵ درصد به علت تاثیر منفی بر پارامترهای اندازه‌گیری شده، توصیه نمی‌شود.

استناد: سیاه منصور، سارا؛ احتشام‌نیا، عبداله؛ و رضایی‌نژاد، عبدالحسین(۱۴۰۲). پاسخ‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) به محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید تحت تنش کم آبی. *نشریه علوم باغبانی ایران*، ۵۴ (۱)، ۸۳-۶۷. DOI: http//doi.org/10.22059/IJHS.2023.329083.1964

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: http//doi.org/10.22059/IJHS.2023.329083.1964

مقدمه

بخش کشاورزی، از عمده‌ترین مصرف کننده‌های آب می‌باشد. در نتیجه اولین پیامد کمبود آب، تاثیر بر محصولات کشاورزی است (Hernandez and Uddameri, 2010 ;Garcia-Garizabal *et al.*, 2011). از جمله فرایندهایی که تحت تاثیر تنش کم‌آبی قرار دارند می‌توان به فتوسنتز، پتانسیل اسمزی و هدایت روزنه‌ای اشاره کرد (Rashid *et al.*, 2014). تنش کم‌آبی موجب کاهش اندازه و افزایش تراکم روزنه‌های برگ می‌شود؛ همچنین کاهش هدایت روزنه‌ای را نیز موجب می‌شود (Ghaderi *et al.*, 2015). علاوه بر سیستم‌های دفاعی که در خود گیاه وجود دارد، روش‌های دیگری برای افزایش مقاومت گیاهان وجود دارد که شامل استفاده از مواد تنظیم‌کننده رشد گیاهی می‌باشد. سالیسیلیک اسید (۲-هیدروکسی بنزوییک اسید) یک ترکیب فنولی و هورمون طبیعی بوده و به عنوان یکی از ترکیبات متداول مورد استفاده در پاسخ به تنش‌های محیطی شناخته شده است (Keshavarz *et al.*, 2012). این ترکیب سیستم دفاعی گیاه را از طریق القای رونویسی گروه مشخصی از ژن‌های مرتبط با دفاع و توسعه مقاومت سیستمیک تحریک می‌کند (Gao-Bin *et al.*, 2009). همچنین بر سرعت تولید انواع اکسیژن فعال، اثر گذاشته و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را تغییر می‌دهد و از این طریق، تحمل گیاه را به تنش‌های محیطی افزایش می‌دهد (Harvath *et al.*, 2007). سالیسیلیک اسید در تنظیم فرآیندهای مختلف از جمله: جذب یون و انتقال آن، جوانه‌زنی بذور، رشد و نمو، فتوسنتز، تبادلات گازی، تنفس و چرخه گلدهی در گیاه ایفای نقش می‌کند، به‌طور کلی، این هورمون بخشی از چندین فرآیند مختلف گیاهی است و نقش آن، کاهش اثرات تنش‌های محیطی یا غیرزنده می‌باشد (Vicente and Plasencia, 2011; Shemi *et al.*, 2021). فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) از خانواده سولاناسه (Zhang and Lu, 1999)، گیاهی چند ساله و علفی است که منشا آن مناطق گرمسیر و نیمه گرمسیر آمریکای جنوبی می‌باشد (Morton,1987). این گیاه دارای عادت رشد نامحدود است و ارتفاع آن به ۱/۵-۱ متر می‌رسد. برگ‌های آن ساده، قلبی شکل و متناوب و ریشه‌هایی به طول ۵۰ تا۸۰ سانتی‌متر دارد (Flores *et al*, 2000).

پیشینه پژوهش

Roohani *et al.* (2013) ویژگی‌های روزنه‌ای برخی ژنوتیپ‌های جو را در شرایط تنش کم‌آبی بررسی کردند و نشان دادند که تنش کم‌آبی تراکم روزنه را افزایش داد اما طول سلول‌های نگهبان روزنه را کاهش داد. نتایج پژوهش Deveci and Kliec (2016) که به بررسی اثر چهار سطح آبیاری (شاهد، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای) بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی فیسالیس پرداختند، نشان دادند که با افزایش شدت تنش کم‌آبی، میزان خسارت به دیواره سلولی افزایش یافت، همچنین مقدار نسبی آب برگ و شاخص کلروفیل در فیسالیس کاهش و تراکم روزنه افزایش نشان داد. Masoudi sedghiani *et al.* (2016) اثر تنش کم‌آبی بر فعالیت آنزیمی و اسمولیت‌های گیاه سیب زمینی در شرایط گلخانه را بررسی کردند، در این پژوهش ۴ سطح آبیاری کامل (شاهد)، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای را اعمال کردند و اظهار داشتند که تنش کم‌آبی فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش داده و بیش‌ترین میزان فعالیت این آنزیم در سطح آبیاری ۴۰ درصد بود، اما آنزیم آسکوربات پراکسیداز تحت تاثیر رژیم‌های آبیاری نبود و فعالیت آن تغییر چندانی نشان نداد. از نتایج پژوهشی که به منظور بررسی اثرات سالیسیلیک اسید و سایکوسل بر روند تبادلات گازی گیاه بادرشبویه در شرایط تنش کم‌آبی انجام شد، مشخص شد که سالیسیلیک اسید موجب افزایش هدایت روزنه، تعرق و نیز نرخ فتوسنتز شد، همچنین میزان کربن دی‌اکسید زیر روزنه در تمام مراحل رشدی گیاه روندی افزایشی داشت اما نرخ فتوسنتز، تعرق و هدایت روزنه در شرایط تنش کم‌آبی کاهش نشان دادند (Silva- lebota *et al.*, 2020). Jalalvand *et al.* (2017) اثر سالیسیلیک اسید را بر برخی ویژگی‌های گوجه فرنگی تحت تنش کم‌آبی مورد بررسی قرار دادند، بررسی تبادلات گازی و برخی ویژگی‌های روزنه‌ای نشان داد که سالیسیلیک اسید هدایت روزنه‌ای را کاهش داد و موجب افزایش تبخیر شد. شاخص روزنه‌ای، تراکم روزنه و نرخ فتوسنتز در تیمار سالیسیلیک اسید، هم در شرایط آبیاری کامل و هم در شرایط تنش کم‌آبی افزایش یافت. سالیسیلیک اسید موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز شد، تنش کم‌آبی، میزان نشت الکترولیت و مالون‌دی‌آلدئید را افزایش داد اما در گیاهان تیمار

شده با سالیسیلیک اسید نشت الکترولیت و مالون‌دی‌آلدئید کم‌تری مشاهده شد. با توجه به بررسی منابع، در مورد اثر سالیسیلیک اسید در تنش کم‌آبی بر گیاه فیسالیس مطالعات اندکی انجام گرفته است، بنابراین شناخت واکنش این گیاه نسبت به اثرات تنش و نقش سالیسیلیک اسید در کاهش اثرات منفی این تنش، حائز اهمیت است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و رشدی و نیز فعالیت برخی آنزیم‌های گیاه فیسالیس نسبت به تنش کم‌آبی و نقش سالیسیلیک اسید در بهبود اثرات منفی کم‌آبی بود.

روش‌شناسی پژوهش

آماده سازی مواد گیاهی و شرایط رشد

این پژوهش در سال ۱۳۹۷ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان واقع در شهرستان خرم‌آباد، به‌صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملا تصادفی انجام شد. گلخانه واقع در طول ۴۸ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و عرض ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۱۲۵متر از سطح دریا، رطوبت نسبی گلخانه ۹۰-۶۰ درصد، شدت نور ۶۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه، دمای گلخانه، روزانه ۲۸-۳۰ و دمای شبانه ۲۴-۲۲ درجه سانتی‌گراد و شروع کاشت اواخر اردیبهشت ماه بود. دانهال‌های فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) از شرکت ایران به‌لیمو تهیه و پس از آن به گلدان‌های پلاستیکی ۱۰ لیتری حاوی خاک (جدول ۱)، ماسه و کود حیوانی به نسبت ۲:۱:۱ منتقل شدند. قبل از کاشت گیاه، یک سانتی متر شن درشت (سنگریزه) به عنوان زهکش در گلدان قرار داده و سپس مخلوط حاوی ۲ قسمت خاک الک شده، ۱ قسمت کود حیوانی پوسیده و ۱ قسمت ماسه شسته شده در گلدان ریخته شد. آبیاری گیاهان در سه سطح انجام شد که این سطوح شامل کنترل (۹۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای)، و دو سطح تنش کم‌آبی (۸۵ درصد و ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای) دو هفته پس از انتقال نشا انجام شد. سالیسیلیک اسید در چهار سطح (صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌مولار) و یک هفته قبل از اعمال تنش کم‌آبی به کاربرده شد و به فاصله ۱۰ روز یکبار محلول‌پاشی انجام شد. جهت اعمال تنش کم‌آبی و کنترل رطوبت، ابتدا ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین شد سپس تا مرحله ۴ برگی، تمام گلدان‌ها به صورت یکسان آبیاری شدند و در مرحله ۴ برگی، تیمارهای ۹۵ درصد، ۸۵ درصد و ۷۵ درصد طرفیت زراعی اعمال شد. برای تعیین مقدار آب خاک ابتدا از روش وزنی استفاده شد، به این ترتیب ۶ گلدان تا حد اشباع آبیاری شد و وزن این ۶ گلدان در فواصل ۲ ساعته اندازه‌گیری شد و تا زمانیکه دو عدد متوالی به طور تقریبی به عدد ثابتی رسید، رطوبت خاک گلدان اندازه‌گیری و به عنوان رطوبت در ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد. نمونه‌های خاک در دستگاه صفحات فشاری قرار داده شد سپس فشار مورد نظر (۰/۱ بار) به آن اعمال گردید. پس از گذشت ۲۴ ساعت و به تعادل رسیدن رطوبت، درصد رطوبت نمونه-ها با استفاده از دستگاه آون تعیین شد. ظرفیت زراعی ۲۴/۹۸ تعیین شد. سپس برای تعیین مقدار رابطه عددی ارائه شده توسط دستگاه TDR و درصد رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شده روابط ۱ و ۲ استفاده شد و سپس براساس تناسبات مورد استفاده، قرائت‌های دستگاه با ظرفیت زراعی معادلسازی و به ترتیب گفته شده برای هریک از سطوح آبیاری در نظر گرفته شد.

$$X=TW-(SW+PW+DW)$$ رابطه ۱)

X: مقدار آب خاک گلدان، TW: وزن کل، SW: وزن خاک خشک، PW: وزن گلدان، DW: وزن زهکش

رابطه ۲) جرم مخصوص ظاهری خاک * رطوبت وزنی = رطوبت حجمی

جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده

بافت	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته	ظرفیت زراعی (درصد)
لوم-رس-شن	۲۴/۲	۴/۰۸	۷۱/۷۱	۰/۴	۷/۵	۲۴/۹۸

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی

مقدار نسبی آب برگ: برای اندازه‌گیری مقدار نسبی آب از روش Ritchi *et al.* (1990) استفاده شد. به این منظور ابتدا وزن تر برگ به دست آمد سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر قرار داده شد و مجددا وزن شد و پس از آن وزن خشک با قرار دادن برگ در آون (۸۰ درجه به مدت ۴۸ ساعت) ثبت شد. سپس با استفاده از رابطه ۳ مقدار نسبی آب برگ به دست آمد.

$$RWC\ (\%) = (FW - DW/TW - DW) \quad \text{رابطه ۳)}$$

FW: وزن تر، TW: وزن پس از تورژسانس، DW: وزن خشک

مالون‌دی‌آلدئید: برای سنجش مالون‌دی‌آلدئید، بافت تازه برگ (۰/۵ گرم) با ۵ میلی‌لیتر تری‌کلرواستیک‌اسید ۲۰ درصد و تری باربیوتیک‌اسید ۰/۵ درصد سائیده شد. به این صورت که، ۰/۵ گرم تیوباربیتوریک‌اسید در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب حل شد، سپس ۲۰ گرم تری‌کلرواستیک‌اسید در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب حل شد و این دو ماده با هم ترکیب و از محلول حاصل ۵ میلی‌لیتر برداشته شد. پس از سانتریفیوژ (۶۰۰۰ دور به مدت ۵ دقیقه) محلول رویی به مدت ۲۵ دقیقه در حمام آب گرم قرار گرفت. در نهایت مقدار جذب مالون‌دی‌آلدئید در دو طول موج ۶۰۰ و ۵۳۲ نانومتر قرائت شد (Buge and Aust, 1978) و مقدار مالون دی آلدئید با استفاده از رابطه ۴ به دست آمد.

$$MDA = \{(A532 - A600)/155\} \times 100 \quad \text{رابطه ۴)}$$

نشت الکترولیت: به منظور به دست آوردن میزان نشت الکترولیت، پس از شست و شوی برگ‌ها (با آب مقطر)، دیسک‌هایی به اندازه ۲ سانتی‌متر مربع از هر برگ تهیه شد و در لوله‌های حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. پس از آن، هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه سنجش هدایت الکتریکی، تعیین شد (EC1). سپس لوله‌های حاوی محلول، به مدت ۲۰ دقیقه در اتوکلاو (دمای ۱۲۰ درجه) قرار داده شد و پس از سرد شدن مجددا هدایت الکتریکی آن اندازه‌گیری شد (EC2). درصد نشت یونی با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد (Luttes *et al.*, 1996).

$$EC\ (\%) = (EC1/EC2) * 100 \quad \text{رابطه ۵)}$$

EC_1: هدایت الکتریکی اولیه، EC_2: هدایت الکتریکی ثانویه

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز): آنزیم پراکسیداز به روش Mac-Adam *et al.* (1992) اندازه‌گیری شد. ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات (پی اچ ۶/۸) به ۰/۳ گرم بافت تازه برگ اضافه و پس از سانتریفیوژ (۱۴۰۰۰ دور به مدت ۲۰ دقیقه) مقدار جذب آنزیم در طول موج ۴۷۵ نانومتر قرائت شد. برای اندازه‌گیری آنزیم کاتالاز، ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم به ۰/۳ گرم بافت برگ اضافه شد و قرائت آنزیم در طول موج ۲۴۰ نانومتر انجام شد (Chance and Maheli, 1996). به منظور اندازه‌گیری آنزیم آسکوربات نیز روش Nakano and Asada (1981) به کار گرفته شد. برای به دست آوردن عصاره، ۱ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم به ۰/۱ گرم بافت برگ اضافه شد و مقدار فعالیت آنزیم به صورت میکرومول در میلی‌لیتر آسکوربات پراکسیداز در دقیقه در میلی‌لیتر عصاره به دست آمد.

تبادلات گازی: فاکتورهای تبادلات گازی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری تبادلات گازی قابل حمل (LCA4, ADC Bioscientific, Ltd., Hoddesdon, England) و در برگ‌های بالایی اندازه‌گیری شد. در زمان اندازه‌گیری تبادلات گازی، سطح برگ زیر اتاقک ۶ سانتی‌متر، دمای زیر اتاقک ۲۹-۲۶ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۲-۵۸ درصد بود. اساس کار این دستگاه بر میزان کربن دی‌اکسید مصرفی می‌باشد. هدایت روزنه‌ای و تعرق براساس میلی‌مول (آب) بر مترمربع در ثانیه و سرعت فتوسنتز براساس میکرومول (کربن دی‌اکسید) بر مترمربع در ثانیه اندازه‌گیری شد.

ویژگی‌های روزنه‌ای: برای محاسبه تعداد روزنه، تراکم روزنه، طول و عرض سلول نگهبان روزنه و شاخص روزنه‌ای از روش Rezaee nejad and Mitren (2005) استفاده شد. در این روش نمونه‌ها به صورت تصادفی انتخاب شد و پس از انتقال به آزمایشگاه، با استفاده از روش کپی‌برداری و میکروسکوپ و نرم افزار Image tools ویژگی‌های روزنه‌ای در قسمت سطح زیرین برگ ثبت شد. شاخص روزنه‌ای با استفاده رابطه ۶ محاسبه شد.

$$SI = [S/(E + S)] * 100$$ رابطه ۶)

SI: شاخص روزنه، S: تعداد روزنه در میلی‌متر برگ و E: تعداد سلول‌های اپیدرمی در میلی‌متر برگ

آنالیزهای آماری: آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملا تصادفی و با سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار مینی تب و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معناداری در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

یافته‌های پژوهش

اثرات تنش کم‌آبی و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر فیزیولوژی گیاه فیسالیس

مقدار نسبی آب برگ

طبق نتایج جدول ۲، اثر تنش کم‌آبی و سالیسیلیک اسید در سطح یک درصد بر مقدار نسبی آب معنی‌دار بود. تنش منجر به کاهش مقدار آب برگ در گیاه فیسالیس شد و این کاهش در ظرفیت مزرعه‌ای ۷۵ درصد شدیدتر بود. سالیسیلیک اسید در تمام غلظت‌ها، مقدار نسبی را افزایش داد و بیش‌ترین میزان مقدار نسبی متعلق به غلظت ۲ میلی‌مولار در آبیاری کامل بود (شکل a-۱). پژوهش‌های انجام شده نشان داده که سالیسیلیک اسید، مقدار نسبی آب برگ را در تنش کم‌آبی، در گوجه فرنگی (Noori *et al.*, 2018) و توت فرنگی (Ghaderi *et al.*, 2015) افزایش داد که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر تنش کم‌آبی و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و تبادلات گازی گیاه فیسالیس

		میانگین مربعات						
منابع تغییرات	درجه آزادی	نرخ فتوسنتز (میکرومول در متر مربع در ثانیه)	هدایت روزنه (میکرومول در متر مربع در ثانیه)	غلظت کربن دی اکسید اتاقک زیر روزنه	تعرق (میلی-مول در مترمربع در ثانیه)	محتوای نسبی آب (درصد)	نشت الکترولیت (درصد)	مالون دی آلدئید (میکروگرم در گرم وزن تازه)
تنش	۲	۲۱۷/۳۵**	۱۴۷/۳۰۵**	۲۲۹۰۱/۰**	۱۳/۲۰۵**	۲۶۴۸/۰۱**	۱۹۷۶/۳۵**	۳۶/۹۲**
سالیسیلیک	۳	۵۷/۲۵**	۱۲/۸۹۳**	۱۲۵۵۳/۳**	۰/۰۲۲ns	۳۶۶/۰۹**	۷۳/۴۲**	۱/۶۷**
تنش*سالیسیلیک	۶	۹/۹۷**	۱۵/۷۲۱**	۶۸۱۵/۰**	۰/۰۳۵ns	۲۰/۱۴**	۹۸/۶۵**	۱/۲۶**
خطا	۲۴	۰/۱۱۴	۰/۰۶۷	۰/۶	۰/۰۲۸۱	۰/۴۶	۳/۲۱	۰/۰۴۶
C.V.%	–	۲/۴۵	۱/۷۵	۰/۱۸	۷/۳۶	۱/۰۸	۴/۶۱	۱۰/۲۸

*، ** و ns: به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم اختلاف معنادار. (منبع: یافته های تحقیق)

میزان مالون‌دی‌آلدئید و نشت الکترولیتی

اثر تنش کم‌آبی و تیمار سالیسیلیک اسید بر نشت الکترولیت و مالون‌دی‌آلدئید در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین میزان نشت و مالون‌دی‌آلدئید در ظرفیت مزرعه‌ای ۷۵ درصد بدون کاربرد سالیسیلیک اسید مشاهده شد (شکل b-

۱ و c–۱). در تیمار شاهد (ظرفیت مزرعه‌ای ۹۵ درصد) غلظت ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید میزان نشت الکترولیت و مالون‌دی‌آلدئید را افزایش داد، اما در سطوح ۱ و ۲ میلی‌مولار مجددا کاهش یافت. در سطوح ۷۵ و ۸۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای بین سطوح سالیسیلیک اسید از نظر کاهش نشت اختلاف معنادار بین غلظت ۰/۵ و ۲ میلی‌مولار در ظرفیت مزرعه‌ای ۷۵ درصد و غلظت ۱ و ۲ میلی‌مولار در سطح آبیاری ۸۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای مشاهده شد. تاثیر مثبت سالیسیلیک اسید بر کاهش میزان نشت یونی و مالون‌دی‌آلدئید توسط Silva-lebota *et al.* (2020) و Sabokdast *et al.* (2022) نیز گزارش شده که تاییدکننده نتایج پژوهش حاضر می‌باشد.

اثر تنش کم‌آبی و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر پارامترهای تبادلات گازی برگ‌های فیسالیس

نتایج نشان داد که اثرات متقابل تنش کم‌آبی و سالیسیلیک اسید بر نرخ فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و غلظت کربن دی‌اکسید اتاقک زیر روزنه در سطح یک درصد معنی‌دار بود اما اثر متقابل برای تعرق معنی‌دار نشد و تنها اثر اصلی کم‌آبی در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هدایت روزنه‌ای برگ با افزایش تنش کاهش یافت. در تیمار شاهد، کاربرد سالیسیلیک اسید هدایت روزنه‌ای را کاهش، اما در ظرفیت مزرعه‌ای ۸۵ درصد در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار میزان هدایت روزنه‌ای را افزایش داد. در ظرفیت مزرعه‌ای ۷۵ درصد، غلظت ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید نسبت به دو سطح دیگر بالاترین میزان را به خود اختصاص داد. نرخ فتوسنتز در سطوح ۸۵ و ۷۵ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. کاربرد سالیسیلیک اسید در تمام سطوح آبیاری موجب افزایش نرخ فتوسنتز شد. بالاترین نرخ فتوسنتز در سطح آبیاری ۸۵ درصد، در غلظت یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید و در سطح آبیاری شاهد و ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای در غلظت ۲ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید مشاهده شد (شکل a–۲). با کاهش سطح آبیاری، میزان تعرق کاهش نشان داد و کاربرد سالیسیلیک اسید اثر چندانی بر میزان تعرق نداشت. میزان کربن دی‌اکسید اتاقک زیر روزنه در شرایط تنش کاهش یافت (شکل d–۲).

اثر تنش کم‌آبی و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر رفتار روزنه‌ای گیاه فیسالیس

نتایج تجزیه واریانس اثر تنش کم‌آبی و سالیسیلیک اسید بر رفتار روزنه‌ای گیاه فیسالیس در جدول ۳ نشان داده شده است. اثر این دو تیمار بر ویژگی‌های روزنه‌ای در سطح یک درصد معنی‌دار شد. طول روزنه با افزایش تنش کم‌آبی کاهش یافت، بیش‌ترین طول روزنه در غلظت ۲ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید در ظرفیت مزرعه‌ای ۷۵ درصد وجود داشت (شکل d–۱). تیمار سالیسیلیک اسید در غلظت‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار در تیمار شاهد آبیاری موجب افزایش طول روزنه شد و غلظت ۲ میلی‌مولار طول روزنه را کاهش داد، به طوری که کم‌ترین طول روزنه در این سطح وجود داشت. در تیمارهای آبیاری ۸۵ و ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای کاربرد سالیسیلیک اسید در تمام غلظت‌ها طول روزنه را افزایش داد. عرض سلول روزنه در بین سه سطح آبیاری (بدون کاربرد سالیسیلیک اسید) اختلاف معناداری نشان نداد. با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید در تیمار شاهد، عرض روزنه کاهش یافت (شکل e–۱). در ظرفیت مزرعه‌ای ۸۵ درصد، با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید عرض روزنه روند افزایشی داشت و در ظرفیت مزرعه‌ای ۷۵ درصد بین غلظت‌های سالیسیلیک اسید اختلاف معناداری مشاهده نشد. تراکم روزنه با افزایش سطح تنش، افزایش یافت اما بین سه سطح آبیاری اختلاف معنادار نبود. کاربرد سالیسیلیک اسید در شرایط آبیاری کامل (۹۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای) موجب افزایش تراکم روزنه و در دو سطح آبیاری ۸۵ و ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای منجر به کاهش تراکم روزنه شد (شکل f–۱). سطوح ظرفیت مزرعه‌ای ۸۵ و ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای اختلاف معناداری از نظر تراکم روزنه نداشتند. شاخص روزنه با افزایش سطح تنش از ۸۵ به ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای کاهش یافت. در سطح ۹۵ و ۸۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای، شاخص روزنه‌ای تغییر چندانی نشان نداد. بیش‌ترین شاخص روزنه‌ای در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید در آبیاری کامل با اختلاف معنادار نسبت به سایر سطوح مشاهده شد (شکل g–۱). نتایج تحقیق Deveci and Kliec (2016) در مورد افزایش تراکم روزنه در گیاه فیسالیس با نتایج تحقیق حاضر سازگار است. اثر سالیسیلیک اسید بر افزایش

تراکم و شاخص روزنه در گیاه گوجه فرنگی توسط Silva-lebota *et al*. (2020) مشاهده شد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت ندارد. در گیاه جو نیز افزایش تراکم روزنه و کاهش طول روزنه در شرایط تنش کم‌آبی گزارش شده است (Roohani *et al*., 2013).

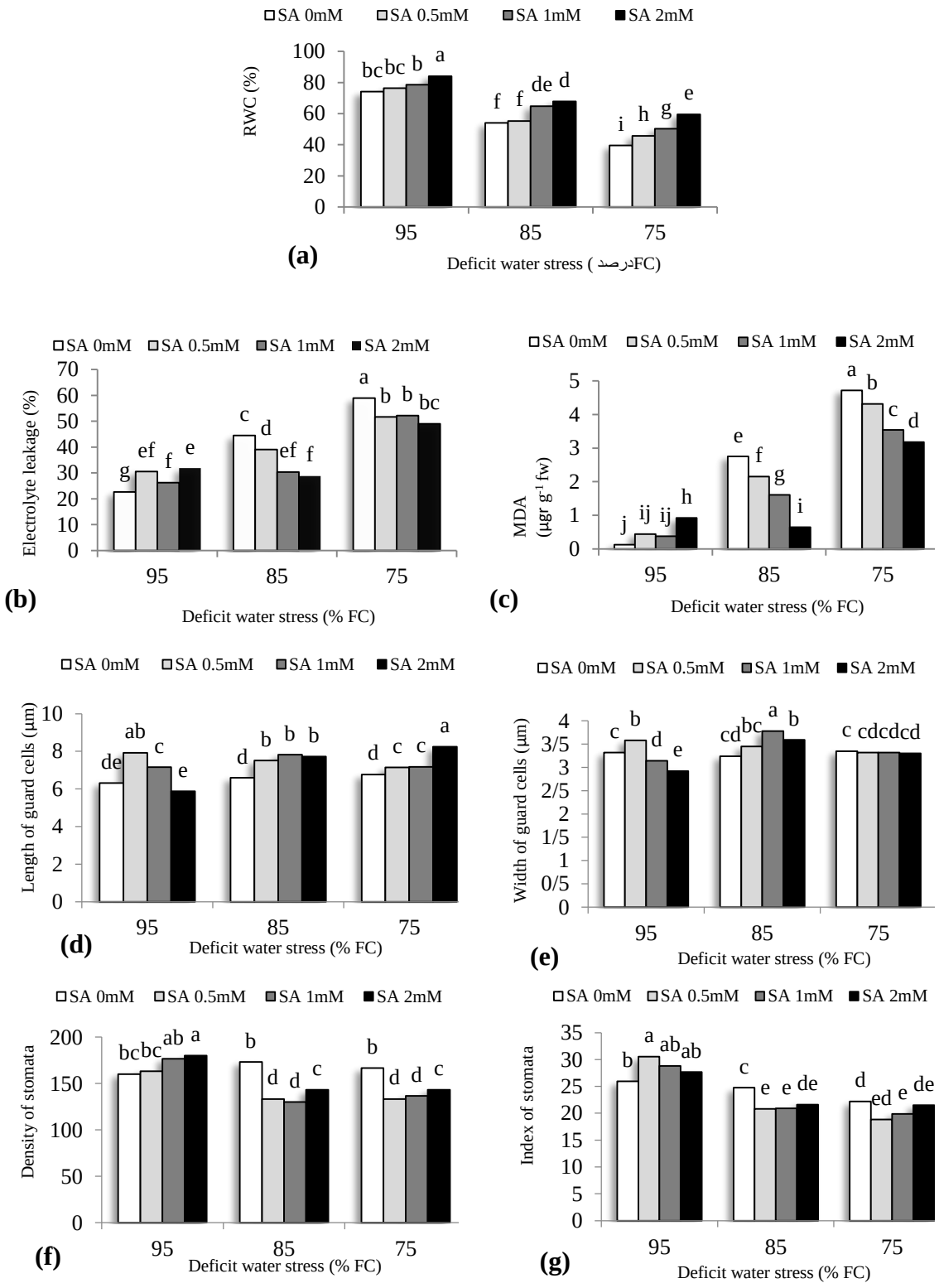
جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تنش کم‌آبی و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های روزنه‌ای و فعالیت آنزیم‌های گیاه فیسالیس

		میانگین مربعات						
منابع تغییرات	درجه آزادی	طول روزنه (میکرومتر)	عرض روزنه (میکرومتر)	تراکم روزنه	شاخص روزنه	کاتالاز (واحد در گرم وزن تازه)	پراکسیداز (واحد در گرم وزن تازه)	آسکوربات (واحد در گرم وزن تازه)
تنش	۲	۱/۲۴**	۰/۱۹۱**	۲۵۰۰**	۱۹۸/۷۴**	۰/۰۰۰۳۵۴**	۰/۰۷۰^{ns}	۰/۰۸۱۲**
سالیسیلیک اسید	۳	۱/۶۸**	۰/۰۸۳*	۹۴۰/۷**	۲/۰۴۲^{ns}	۰/۰۰۰۶۳*	۰/۰۳۴۵^{ns}	۰/۰۲۱۶**
تنش×سالیسیلیک اسید	۶	۱/۴۷**	۰/۱۹۱۱**	۵۹۶/۳**	۱۳/۱۶**	۰/۰۰۰۱۹**	۰/۱۹۷**	۰/۰۶۱**
خطا	۲۴	۰/۰۴۶	۰/۰۲۰	۶۶/۶۷	۰/۹۴۹	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۱۵
C.V.%	–	۳/۰۰۱	۴/۲۶	۵/۳۲	۴/۱۲	۲۵/۶۲	۳/۳۵	۱۳/۲۱

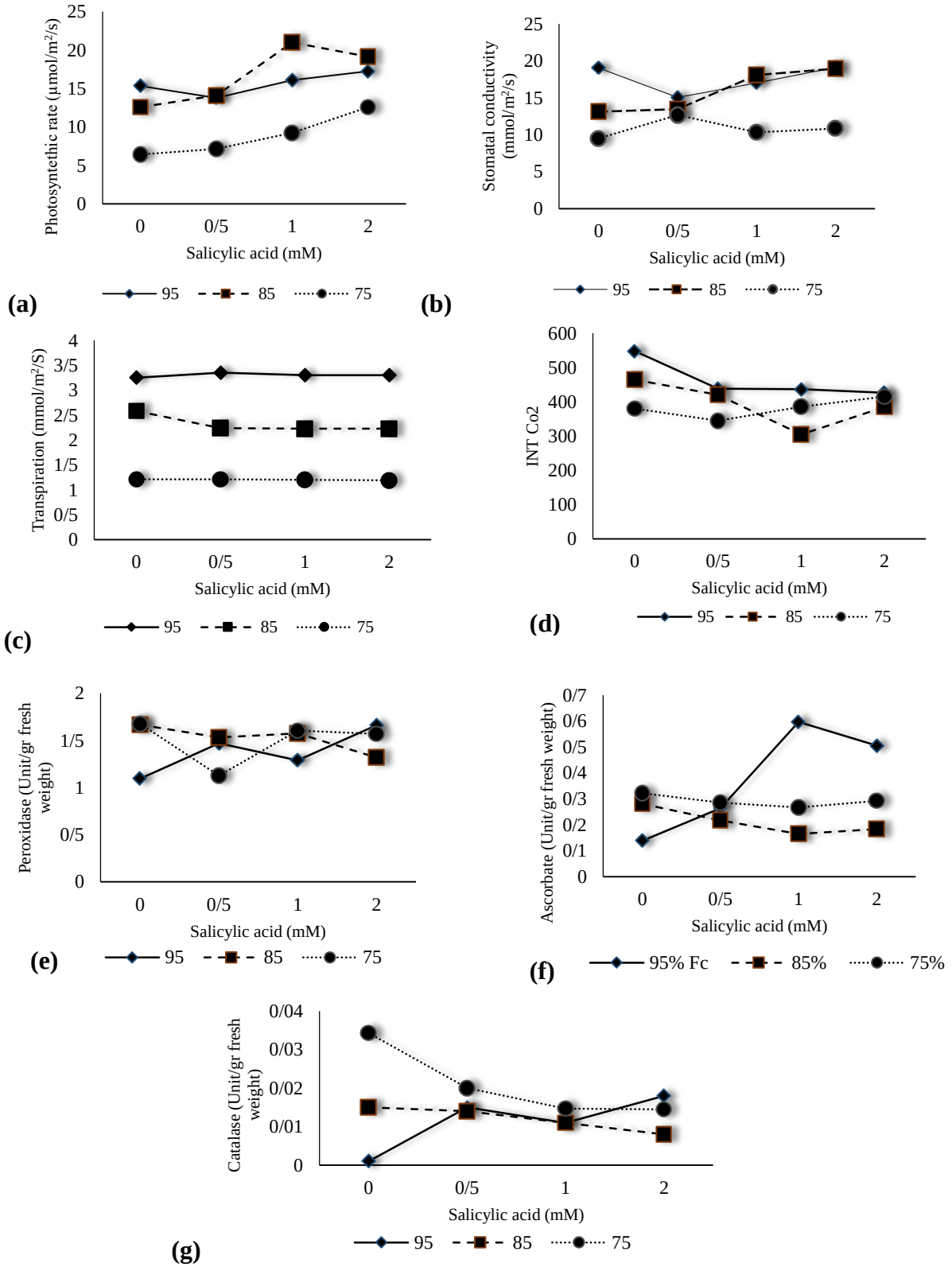
*، ** و ns: به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم اختلاف معنادار. (منبع: یافته های تحقیق)

اثر تنش کم‌آبی و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه فیسالیس

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داده که اثرات متقابل تنش کم‌آبی و سالیسیلیک اسید بر آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). اثرات اصلی کم‌آبی و سالیسیلیک اسید بر آنزیم پراکسیداز معنی‌دار نشد اما اثرات متقابل در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. با افزایش تنش کم‌آبی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش یافت. بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز در ظرفیت مزرعه‌ای ۷۵ درصد (بدون کاربرد سالیسیلیک اسید) وجود داشت. کاربرد سالیسیلیک اسید در تیمار شاهد در سطوح ۰/۵ و ۲ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید بیش‌ترین میزان را به خود اختصاص داد. اما در سطوح آبیاری ۸۵ و ۷۵ درصد، سالیسیلیک اسید غلظت آنزیم‌ها را کاهش داد. کم‌ترین فعالیت آنزیم در تیمار شاهد و عدم کاربرد سالیسیلیک اسید وجود داشت. بین سطوح صفر و ۰/۵ میلی‌مولار در ظرفیت مزرعه‌ای ۸۵ درصد و سطوح ۱ و ۲ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید در ظرفیت مزرعه‌ای ۷۵ درصد اختلاف معناداری مشاهده نشد (شکل g–۲). غلظت آنزیم پراکسیداز با افزایش تنش افزایش یافت و بیش‌ترین میزان این آنزیم در سطوح ۸۵ و ۷۵ درصد و عدم کاربرد سالیسیلیک اسید مشاهده شد. در ظرفیت مزرعه‌ای ۸۵ و ۷۵ درصد بین سطوح ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید اختلاف معنی‌دار نبود (شکل e–۲). همانطور که در شکل f–۲ نشان داده شده، فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار شاهد آبیاری در غلظت ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید بیش‌ترین میزان را نشان داد، بین سطوح سالیسیلیک اسید در ظرفیت مزرعه‌ای ۸۵ درصد و ۷۵ درصد نیز اختلاف معنادار نبود، و نسبت به شرایط عدم کاربرد روند کاهشی در فعالیت آنزیم آسکوربات مشاهده شد. بررسی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در این تحقیق نشان داد که میزان فعالیت آنزیم در شرایط تنش افزایش یافت. افزایش در فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در گوجه فرنگی با کاربرد سالیسیلیک اسید در تحقیق Silva- lebota *et al*. (2020) با نتایج فوق مطابقت نداشت. در پژوهش انجام شده توسط Sabokdast *et al*. (2022) در گیاه لوبیا، سالیسیلیک اسید فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داد که با نتایج این پژوهش سازگار است.



شکل ۱. مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه فیسالیس برای اثر متقابل تنش کم‌آبی و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید. (منبع: یافته های تحقیق)



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر تبادلات گازی و فعالیت آنزیم‌های گیاه فیسالیس. (منبع: یافته های تحقیق)

بحث

تحقیقات نشان داده که ارتباط مستقیمی بین محتوای نسبی آب برگ با هدایت روزنه، تعرق و فتوسنتز وجود دارد، به همین ترتیب، گیاهانی که توانایی حفظ محتوای آب خود را داشته باشند، عملکرد مطلوبی از خود نشان خواهند داد (Tatrai *et al.*, 2016). گیاهان حساس به تنش کم‌آبی، توانایی جلوگیری از کاهش تعرق را نداشته که این امر با اثر بر انتقال فعال و غیر فعال به ترتیب در آوند آبکشی و چوبی آنها را در معرض کاهش فشار تورژسانس و در نهایت پژمردگی قرار می‌دهد (Rahbarrian *et al.*, 2011). سالیسیلیک اسید سیستم دفاعی گیاه را افزایش داده و با کاهش تعرق، میزان مقدار نسبی آب برگ را افزایش می‌دهد (Taheriet al., 2017). هم‌چنین با تجمع مواد اسمولیت داخل سلول و افزایش سطح ریشه نسبت به ساقه موجب حفظ رطوبت نسبی در گیاه می‌شود (Kadioglu *et al.*, 2011). خسارت به غشای سلول، تخریب آن و در نهایت نشت مواد داخل سلول به محیط بین سلولی، یکی از جدی‌ترین آسیب‌های تنش کم‌آبی است که به گیاه وارد می‌شود، در این شرایط فسفولیپیدهای غشا تغییر شکل داده و یکپارچگی آن‌ها از بین می‌رود و در نتیجه غشا سلولی توانایی حفظ ترکیبات سلولی را از دست می‌دهد (Osakab *et al.*, 2014). در شرایط تنش کم‌آبی، فسفولیپیدهای غشا که دولایه هستند شکل ۶ وجهی (هگزاگونال) به خود می‌گیرند و ساختار غشا به یک ساختار منفذدار و کم مقاومت تبدیل شده و با نشت مواد سلول به بیرون، مقدار ماده تری‌هالوز که در استحکام غشا نقش دارد، کاهش می‌یابد (Gupta *et al.*, 2020; Kapoor *et al.*, 2020). پراکسیداسیون گلیکولیپیدهای تیلاکوئید کلروپلاست، موجب تولید دی‌آسیل‌گلیسرول، تری‌آسیل‌گلیسرول و اسیدهای چرب آزاد شده که در نتیجه آن، تولید مالون‌دی‌آلدئید افزایش خواهد یافت (Hasanuzzaman *et al.*, 2020). ثابت شده که سالیسیلیک اسید با افزایش سطح سیستم آنتی‌اکسیدانی سلول، از اثر رادیکال‌های آزاد بر غشا سلول ممانعت کرده و از نشت یونی و پراکسیده شدن لیپیدهای غشا جلوگیری می‌کند (Hayat *et al.*, 2008). کاربرد سالیسیلیک اسید میزان کربن دی‌اکسید اتاقک زیر روزنه را کاهش داد. کاهش کربن دی‌اکسید اتاقک زیر روزنه‌ای به علت بسته شدن روزنه و جلوگیری از ورود کربن دی‌اکسید به سلول‌های مزوفیل می‌باشد (Zlatev and Yordanov, 2004; Ganjeali *et al.*, 2011). کاهش روزنه‌ها یکی از ویژگی‌های مهم در ارقام مقاوم به تنش کم‌آبی به منظور کنترل عملکرد روزنه‌ای برای تغلیظ کربن دی‌اکسید در کلروپلاست جهت فتوسنتز است (Rahbarrian *et al.*, 2011). کاهش تعرق در شرایط تنش به علت بسته شدن روزنه‌ها و به دنبال آن کاهش هدایت روزنه‌ای می‌باشد که موجب تولید اسیدآبسیزیک در ریشه و انتقال آن به برگ‌ها در اثر کاهش پتانسیل آماسی برگ به وجود می‌آید و از طریق آبسیزیک اسید تولید شده در برگ عمل می‌کند (Yamori *et al.*, 2013). با کاهش سطح آبیاری، نرخ فتوسنتز به علت کاهش تولید کلروفیل و افزایش تجزیه آن به شدت کاهش می‌یابد. سالیسیلیک اسید با افزایش سطح برگ، افزایش کلروفیل و جلوگیری از تولید اتیلن، موجب افزایش سرعت فتوسنتز و ماده خشک گیاه می‌شود (Jalalvand *et al.*, 2017). تنش موجب بسته شدن سلول‌های روزنه و کاهش غلظت دی اکسیدکربن در بافت مزوفیل برگ می‌شود، در نتیجه NADPH در کلروپلاست تجمع می‌یابد. در این حالت میزان $NADP^+$ در دسترس برای انجام واکنش‌های نوری کاهش یافته و اکسیژن به عنوان پذیرنده الکترون عمل کرده و این فرآیند، تولید رادیکال سوپر اکسید و سایر گونه‌های اکسیژن فعال را به دنبال دارد که در نهایت موجب ایجاد تنش اکسیداتیو خواهد شد (Jaleel *et al.*, 2009a). تحقیقات نشان داده که وضعیت آبی برگ با میزان هدایت روزنه‌ای برگ در ارتباط است (Ashraf and Harris, 2013). گیاهان در شرایط تنش کم‌آبی، هدایت روزنه‌ای را به خاطر جلوگیری از اتلاف آب، کاهش می‌دهند (Chinnusamy, 2004). کاهش آب در دسترس برای گیاه، فرآیند فیزیولوژیکی گیاه را تحت تاثیر قرار داده و اثرات منفی بر آن‌ها بر جای می‌گذارد و این کاهش موجب کاهش شدید عملکرد و رشد می‌شود. کاهش فتوسنتز در واکنش به تنش کم‌آبی به اثبات رسیده است (Afshar *et al.*, 2016; Akhtar *et al.*, 2014). که به دلیل محدودیت‌های روزنه‌ای و غیر روزنه‌ای رخ می‌دهد (Alvarez and Sanchez-Blanco, 2013). در پژوهش‌های انجام شده توسط سایر محققان نیز کاربرد سالیسیلیک اسید موجب افزایش تعرق، هدایت روزنه و فتوسنتز در گوجه فرنگی شده است که با نتایج فوق مطابقت دارد (Santana Aires *et al.*, 2022; Silva-lebota *et al.*, 2020). رفتار

روزنه‌ها (باز و بسته شدن) وابسته به فشار آماس و تغییر حجم سلول‌های نگهبان روزنه می‌باشد که به واسطه تجمع مواد اسمولیت، روزنه باز و با کاهش مواد، روزنه بسته می‌شود. در شرایط تنش، به دنبال کاهش مواد معدنی و به هم ریختن تعادل متابولیکی، تغییرات مورفولوژیکی زیادی در روزنه‌های برگ به وجود می‌آید که یکی از بارزترین نشانه‌ها کاهش طول روزنه، بسته شدن آن و کاهش تراکم روزنه می‌باشد (Ren and Wang, 2010). از طرفی، کاربرد سالیسیلیک اسید با بهبود بخشیدن و حفظ محتوای آب گیاه، شرایط متعادلی ایجاد می‌کند که شرایط متعادلی برای باز و بسته شدن روزنه فراهم خواهد شد (Muira and Tada, 2014). تنش‌های محیطی سبب محدود کردن تثبیت کربن دی‌اکسید می‌شوند و مقدار تولید $NADP^+$ نیز کاهش می‌یابد، به دنبال این فرایندها زنجیره انتقال الکترون برانگیخته شده و رادیکال‌های اکسیژن یگانه و سوپراکسید به وجود می‌آیند (Dmitrieva *et al.*, 2020). رادیکال‌های آزاد تولید شده با اکسیداسیون لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدنوکلئیک‌ها در متابولیسم گیاه اختلال ایجاد می‌کنند و به این ترتیب فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت را تحت تاثیر قرار می‌دهند. سه آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز از جمله مهم‌ترین و کارآمدترین آنزیم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی و خط دفاعی اولیه برای حذف رادیکال‌های آزاد هستند. کاتالاز که یکی از آنزیم‌های مهم موجود در پراکسی‌زوم است پراکسیدهیدروژن را بدون هیچگونه نیروی احیایی به آب و اکسیژن تجزیه می‌کند و به دلیل فعالیت کاتالاز در پراکسی‌زوم، آنزیم‌های پراکسیداز و آسکوربات، نقش مهمی در حذف و خنثی‌سازی پراکسیدهیدروژن در سایر اندامک‌ها از جمله کلروپلاست ایفا می‌کنند (Hasanuzzaman *et al.*, 2020). سالیسیلیک اسید زمانی‌که در غلظت و زمان مناسب به کار می‌رود، یک تنش موقت اکسیداتیو در سلول ایجاد کرده که موجب مقاوم‌سازی گیاه شده و درنتیجه فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه افزایش می‌یابد (Hayat *et al.*, 2007). این ماده با تغییر در فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز و سایر آنزیم‌های دخیل در تجزیه پراکسیدهیدروژن موجب افزایش جزئی در میزان پراکسیدهیدروژن به عنوان یک پیام رسان ثانویه شده که موجب القای مقاومت و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود. جهت القای مقاومت فقط به مقدار کمی از پراکسیدهیدروژن نیاز است، زیرا مقادیر بالاتر از آن خود یک عامل در ایجاد تنش اکسیداتیو خواهد بود (Jaleel *et al.*, 2009b).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به نتایج، با کاهش سطح آبیاری و ظرفیت مزرعه‌ای، گیاه فیسالیس با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تغییر در رفتار روزنه‌ای نسبت به تنش واکنش منفی نشان داد. ظرفیت مزرعه‌ای ۷۵ درصد اثرات منفی بیش‌تری بر خصوصیات بیوشیمیایی این گیاه بر جای گذاشته و کاربرد سالیسیلیک اسید در شرایط تنش، ویژگی‌های مورد بررسی گیاه را نسبت به شرایط عدم کاربرد آن بهبود بخشید. با توجه به این‌که ظرفیت مزرعه‌ای ۸۵ درصد و تیمار شاهد در اکثر ویژگی‌ها اختلاف معنادار چندانی نداشته و استفاده از تیمار سالیسیلیک اسید به عنوان یک بهبود دهنده رشد در شرایط تنش عمل کرد، بنابراین می‌توان سطوح آبیاری کامل (۹۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای) و ظرفیت مزرعه‌ای ۸۵ درصد را به همراه کاربرد سالیسیلیک اسید در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار پیشنهاد نمود. اگرچه در سطح آبیاری ۷۵ درصد هم سالیسیلیک اسید اثرات تنش را کاهش داد اما به علت تاثیر منفی بر پارامترهای اندازه‌گیری شده، این سطح از آبیاری توصیه نمی‌شود.

منابع

بابایی، کیوان.، امینی دهقی، مجید.، مدرس ثانوی، سیدمحمدعلی، و جباری، رضا. (۱۳۸۹). اثر تنش خشکی بر صفات مورفولوژیک، میزان پرولین و درصد تیمول در آویشن (*Thymus vulgaris* L.). *فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران*، ۲۶ (۲)، ۲۳۹-۲۵۱.

جلالوند، علی.، عندلیبی، بابک.، توکلی، افشین، و مرادی، پرویز. (۱۳۹۸). تاثیر سالیسیلیک اسید و سایکوسل بر درصد و عملکرد اسانس و ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه بادرشبویه در شرایط تنش خشکی. *نشریه تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۲ (۳)، ۸۶۵-۸۷۶.

مردانی، حسین.، بیات، حسن، و عزیزی، مجید. (۱۳۹۰). تاثیر محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر خصوصیات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دانهال‌های خیار تحت شرایط تنش خشکی. *نشریه علوم باغبانی*، ۲۵(۳)، ۳۲۶-۳۲۰.

مسعودی صدقیانی، فرهاد، و امینی دهقی، مجید. (۱۳۹۵). تغییر در برخی اسمولیت‌ها و تجمع رنگدانه‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیم-های آنتی‌اکسیدانی در سیب زمینی‌های تحت تنش آبی در شرایط گلخانه. *نشریه علوم و فنون باغبانی ایران*، ۱۷(۱)، ۲۹-۳۸.

روحانی، لیلا.، زمانی، محمدجعفر، و فتوت، رضا. (۱۳۹۲). تنوع در ابعاد و تراکم روزنه ژنوتیپ‌های جو تحت تنش خشکی و شرایط نرمال. *مجله پژوهش های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)*، ۲۸ (۵)، ۹۸۶-۹۹۴.

سبکدست نودهی، منیژه، و مرادی، جمشید. (۱۳۹۱). بررسی تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی لوبیا معمولی در پاسخ به محلول پاشی اسید سالسیلیک در شرایط تنش خشکی. *پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی*، ۱۴ (۴۲)، ۱۱۷-۱۲۶.

طاهری، سهیلا.، ارغوانی، مسعود، و مرتضوی، سیدنجم الدین. (۱۳۹۶). ارزیابی مورفوفیزیولوژیکی چمن آفریقایی تحت تاثیر اسید سالیسیلیک در شرایط تنش کم آبی. *مجله علوم باغبانی ایران*، ۴۸ (۲)، ۴۳۱-۴۴۲.

REFERENCES

Abdalla, M. M. & El-Khoshiban, N. H. (2007). The influence of water stress on growth, relative water content, photosynthetic pigments, some metabolic & hormonal contents of two (*Triticum aestivum*) cultivars. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(12), 2062-2074.

Afshara, R.K., Hashemi, M., DaCosta, M., Spargo, J. & Sadeghpour, A. (2016). Biochar application and drought Stress effects on physiological characteristics of *Silybum marianum*. *Communication in Soil Science & Plant Analysis*, 47(6), 743–752.

Akhtar, S., Li. G., Andersen, M.N. & Liu, F. (2014). Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, 138, 37–44.

Alvarez, S. & Sanchez-Blanco, M. J. (2013). Changes in growth rate, root morphology and water use efficiency of potted *Callistemon citrinus* plants in response to different levels of water deficit. *Scientia Horticulturae*, 156, 54–62.

Ashraf, M. & Harris, P. J. C. (2013). Photosynthesis under stressful environments: an overview. *Photosynthetica*, 51(2), 163-190.

Babaee, K., Amini Dehaghi, M., Modares Sanavi, A. & Jabbari, R. (2010). Water deficit effect on morphology, proline content and thymol percentage of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 2(26), 239 -251. (In Persian)

Buege, J. A. & Aust, S. D. (1978). Microsomal lipid peroxidation. *Methods in Enzymology*, 52, 302-310.

Chance, B. & Maehly, A. C. (1995). Assay of catalase and proxidase. *Methods in Enzymology*, Academic Press. New York, 2, 764-775.

Chinnusamy, V. (2004). Use of genetic engineering and molecular biology approaches for crop improvement for stress environments. In: *Abiotic stress: plant resistance through breeding and molecular approaches* (Eds. Xiong, L. and Zhu, J. K.). *Taylor and Francis Press, New York*, 47-107.

Dmitrieva, V.A., Tyutereva, E.V. & Voitsekhovskaja, O.V. (2020). Singlet oxygen in plants: Generation, detection, and signaling roles. *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 3237.

Flores, V. J., Fischer, G. & Sora, A. D. (2000). *Produccion, poscosecha y exportacion de la uchuva (Physalis peruviana* L.*)*. Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Ganjeali, A., Porsa, H. & Bagheri, A. (2011). Assessment of Iranian chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasms for drought tolerance. *Agriculture Water Management*, 98, 1477-1484.

Gao-Bin, P., Dong-Ming, M. C., Jian-Lin, M., Lan-Qing, W., Hong, L., Guo-Feng, Y. & He-Chun, L. (2009). Salicylic acid activates artemisinin biosynthesis in (*Artemisia annua* L.). *Plant Cell Report*, 28, 1127-1135.

Garcia-Garizabal, I., Causape, J. & Abrahao, R. (2011). Application of the irrigation land environmental evaluation tool for flood irrigation management and evaluation of water use. *Catena*, 87 (2), 260–267.

Ghaderi, N., Nourmohammadi, S. & Javadi, T. (2015). Morpho-physiological responses of strawberry (*Fragaria×ananassa*) to exogenous salicylic acid application under drought stress. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 17, 167- 178.

Gupta, A., Rico-Medina, A. & Cano-Delgado, A.I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368, 266 -269.

Hamada, A. M. & Al-Hakimi, A. M. A. (2001). Salicylic acid versus salinity drought-induced stress on wheat seedlings. *Rostlinna Vyroba*, 47(10), 444-450.

Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.B., Zulfiqar, F., Raza, A., Ohsin, S.M., Mahmud, J.A., Fujita, M. & otopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9, 681.

Hayat, S., Hasan, S.A., Fariduddin, Q. & Ahmad, A. (2008). Growth of tomato (*Lycopersicom esculentum*) in response to salicylic acid under water stress. *Journal of Plant Interactions*, 3(4), 297 - 304.

Hernandez, E. A. & Uddameri, V. (2010). Selecting agricultural best management practices for water conservation and quality improvements using atanassov's intuitionistic fuzzy sets. *Water Resource Management*, 24, 4589–4612.

Horvath, E., Szalai, G. & Janda, T. (2007). Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. *Journal of Plant Growth Regulation*, 26, 290 – 300.

Jalalvand, A., Andalibi, B., Tavakoli, A. & Moradi, P. (2017). Investigation of the effects of salicylic acid and cycocel on the process of gas exchanges of *Dracocephalum moldavica* under drought stress conditions. *Environmental stresses in agricultural sciences*, 12 (3), 865-876. (In Persian)

Jaleel, C. A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H. J., Somasundaram, R. & Panneerselvam, R. (2009a). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 100-105.

Jaleel, C. A., Riadh, K., Gopi, R., Manivannan, P., Ines, J., Al-Juburi, H. J., Chang-Xing, Z., Hong-Bo, S. & Panneerselvam, R. (2009b). Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constrains. *Acta Physiologia Plantarum*, 31, 427-436.

Kadioglu, A., Saruhan, N., Saglam, A., Terzi, R. & Acet, T. (2011). Exogenous salicylic acid alleviates effects of long term drought stress and delays leaf rolling by inducing drought stress and delays leaf rolling by inducing antioxidant system. *Plant Growth Regulation*, 64, 27 -37.

Kafi, M. & Rostami. M. (2008). Effect of drought stress in reproductive growth stage on yield and components yield and oil content three safflower cultivars in irrigation with salty water conditions. *Iran Agricultural Research Journal*, 5(1), 121-131.

Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M. & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, 10, 5692.

Kshavarz, H., Modares Sanavi, S. A. M., Zarin Kamr, F., Dolatabadian, A., Panahi, M. & Sadaj Asilan, K. (2012). Evolution effect salicylic acid foliar on same traits biochemical two (*Brasica napus* L.) under cool stress. *Iranian Agricultural Science*, 42, 723-734.

Lutts, S., Kinet, J. M. & Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Ann. Botany*, 78(3), 389-398.

Mac-Adam, J. W., Nelson, C. J. & Sharp, R. E. (1992). Peroxidase Activity in the leaf elongation zone of tall fescue I. Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. *Plant physiology*, 99 (3), 872-878.

Mardani, H., Bayat, H. & Azizi, M. (2011). Effect of salicylic acid on morphological and physiological traits of cucumber under drought stress conditions. *Journal of Horticultural Science*, 25 (3), 320-326. (In Persian)
Masoudi sedghiani, F. & Amini dehghi, M. (2016). Changes in some osmolytes and photosynthetic pigments accumulation and antioxidant enzymes activity in potatoes under water stress in greenhouse codition. *Iranian journal of Horticultural Science and Technology*, 17 (1), 29-38. (In Persian)
Miura, k. & Tada, Y. (2014). Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in Plant Science*, 5(4), 1-12.
Nakano, V. & Asada, K. (1981). Hydrogen Peroxide is scavenged by ascorbate– specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiology*, 22: 867-880.
Noori, M., Motallebi Azar, A., Saidi, M., Panahandeh, J. & Zare Haghi, D. (2018). Evaluation of water deficiency impacts on antioxidant enzymes activity and lipid peroxidation in some tomato (*Solanum lycopersicum* L.) lines. *Indian Journal Agricricultural reaserch*, 52 (3), 228-235.
Rahbarian, R., Khavari-nejad, R., Ganjeali, A., Bagheri, A. R. & Najafi, F. (2011). Drought stress effects on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and water relations in tolerant and susceptible chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. *Acta Biologica Cracoviensia-Series Botanica*, 53, 47-56.
Rashid, B., Husnain, T. & Riazuddin, S. (2014). Genomic approaches and abiotic stress tolerance in plants. *In Emerging technologies and management of crop stress tolerance,* (pp. 1-37). Academic Press.
Ren, A. & Wang, Y. (2010). Effects of salt stress on stomatal differentiation and movement of Amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) leaves. *Acta Horticulturae Sinica*, 37(3), 479-484.
Ritchie S.W. & Hanson A. D. (1990). Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science Journal*, 30, 105-11.
Roohani, L., Zamani, M. J. & Fotovat, R. (2013). Variation in stomatal size and density of barely genotypes under drought stress and normal conditions. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 28 (5), 986-994. (In Persian)
Sabokdast Nodehi, M. & Moradi, J. (2022). Study of the physiological and biochemical changes of common bean in response to foliar application of salcylic acid under drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 14 (42), 117-126. (In Persian).
Santana Aires, E., Lopes Ferraz, A., Carvalho, B., Palla Teixeira, F., Ferrari Putti, F., Possas de Souza, E., Domingos Rodrigues, J. & Orika Ono, E. (2022). Foliar application of salicylic acid to mitigate water stress in tomato. *Plants*, 11, 1775. https://doi.org/10.3390/ plants11131775
Shemi, R., Wang, R., Gheith, E.S.M., Hussain, H.A., Hussain, S., Irfan, M. & Wang, L. (2021). Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, 11, 3195.
Silva Lobato, A., Machado Barbosa, M. A., Abdullah Alsahli, A., Serrao da Silva, B. R. & Alvino Lima, E. J. (2020). Exogenous salicylic acid alleviates the negative impacts on production components, biomass and gas exchange in tomato plants under water deficit improving redox status and anatomical responses. *Physiologia Plantarum*, 1-16.
Silva Rezende, R. A. L., Almendagna Rodrigues, F., Rodrigues Soares, J. D., Oliveira Silveira, H. R. & Gomes Dias, M. (2018). Salt stress and exogenous silicon influence physiological and anatomical features of *in vitro*-grown cape gooseberry. *Ciencia Rural*, 48 (1). https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170176
Taheri, S., Arghavani, M. & Mortazavi, S. (2017). Morphophysiologycal evaluation of Bermuda grass under salicylic acid treatment in water deficit conditions. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 2, 431-442. (In Persian)
Vicente, M.R. & Plasencia, J. (2011). Salicylic acid beyond defence: its role in plant growth and development. *Journal of Experimental Botany*, 62, 1–18.
Yamori, M., Hikosaka, K. & Way, D. A. (2013). Temperature response of photosynthesis in C3, C4 and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis Research*, 13, 74- 76.

Zlatev, Z. S. & Yardanov, I. T. (2004). Effect of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. *Bulgarian Journal of Physiology*, 30, 3-18.