



<https://ijpb.ui.ac.ir/?lang=en>

IRANIAN JOURNAL OF PLANT BIOLOGY

E-ISSN: 2322-2204

Vol. 14, Issue, No. 2, Summer 2022

Document Type: Research Paper

Received: 13/03/2023

Accepted: 27/05/2023

The Effects of Using Salicylic Acid and Silicon on Some Physiological and Anatomical Indices in Two Ecotypes of *Scrophularia striata* L. Medicinal Plant under Drought Stress

Fariba Shohani¹, Arash Fazeli^{2*} , Siavash Hosseini¹

¹ Department of Biology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

² Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

Abstract

Today, water shortage is considered one of the main environmental challenges for plants, leading to metabolic and physiological disorders. It has attracted the attention of researchers in recent years. Salicylic acid (SA) and silicon (Si) are considered two drought stress modifiers in plants. To evaluate the drought stress on the physiological and anatomical index of *Scrophularia striata* for introduction in dry areas during 2020-2021, the present study was conducted as a factorial experiment based on a completely randomized design (CRD) with three replications at the University of Ilam. In this study, drought stress at two levels (50 and 100% of field capacity), SA at two levels (0 and 100 ppm), Si at two levels (0 and 1 g/L) on photosynthesis, gas exchange parameters, leaf relative moisture content, total protein, and anatomical indices were investigated. The results of this experiment showed that drought stress decreases relative leaf water content, total protein, photosynthesis, gas exchange parameters, and electrolyte leakage. Structurally, it caused a reduction in stomatal width, width of stomatal guard cells, stomatal density per unit area, and diameter of vascular tissues. Using SA and Si improved the photosynthesis, gas exchange parameters, relative moisture content, and total protein. In addition, the foliar application of SA and Si led to the improvement of the anatomical index caused by drought stress. The study results showed that drought stress had negative impacts on *Scrophularia striata* L, and using salicylic acid and silicon can improve drought stress tolerance in plants.

Introduction

Drought stress is a major constraint on agricultural productivity, with more than 45% of agricultural land continuously vulnerable to drought. In addition, approximately 38% of the world's population resides in these regions. Several factors, including species, region, duration of stress, and plant growth stage affect the physiological responses of plants to drought stress, as shown by numerous studies (e.g. Kutlu et al., 2009). The

* Corresponding Author: a.fazeli@ilam.ac.ir



water deficit condition is a complex and detrimental abiotic stressor that impacts various metabolic functions such as crop quality and productivity through physiological and morphological mechanisms (Akman et al., 2020; Bhardwaj and Kapoor, 2021). Salicylic acid (SA) is a phenolic compound found in plants serving as an endogenous regulator. It can function as a defense mechanism against both biotic and abiotic stresses and is involved in various physiological processes such as nutrient absorption, membrane stability, water relations, stomatal regulation, photosynthesis, and the inhibition of ethylene biosynthesis (Dianat et al., 2016). Salicylic acid at a concentration of 0.1 g improved membrane, vascular, and mesophyll structures (Bhardwaj and Kapoor, 2021). After oxygen, silicon (Si) is the second most prevalent element in soil (Bhardwaj and Kapoor, 2021). Despite not being classified as an indispensable micronutrient for plants, numerous studies (e.g. Kafi and Rahimi, 2011) have demonstrated the advantageous impact of silicon on plant growth and development. According to a study performed by Seal et al. (2018), the utilization of silicon led to an elevation of the RuBisCo carboxylase enzyme, which consequently induced a surge in photosynthetic activity in plants experiencing drought stress. In this regard, the present study aimed to examine the anatomical and physiological index of *Scrophularia striata* when subjected to drought stress, as well as the potential mitigating effects of salicylic acid and silicon on the adverse impacts of drought stress.

Materials and Methods

In January 2019, seeds from two ecotypes of a flowering plant were procured from the Ilam and Abdanan regions in the western part of the Zagros mountain range. The botanical features of the specimens were subsequently verified in accordance with Flora Iranica. The seeds, obtained with the access code (IUGB02076), have been preserved in the University of Ilam gene bank. Based on the results of drought stress sources at two concentrations (100 and 50% of plant capacity), salicylic acid (0 and 100 ppm) and silicon (0 and 1 g/liter) were applied as foliar spraying in this experiment (Bazi Zlan *et al.*, 2022). The sampling process was carried out to analyze some physiological characteristics and anatomical indices. In addition, control samples and treatment groups were selected for relative humidity traits (Diaz-Perez et al., 2006). Ion leakage (Blum, 1996), soluble protein (Lowry *et al.*, 1951), gas exchange and water relations (Fischer et al., 1998; Akman et al., 2020), stomatal anatomical traits (Akman *et al.*, 2020), and leaf anatomical features (Jafarian *et al.*, 2013) were also measured. The experiment was conducted in a factorial format with three separate replications, and the results were analyzed with SAS software version 9.4. Graphs were drawn with GraphPad software version 9, and both programs were used to interpret the data.

Results and Discussion

The findings of the variance analysis indicate that drought stress had a significant influence at the probability level of 1% on the leaf's relative moisture content, total protein, ion leakage, gas exchange and water relations, and morphological indicators. The four interaction effects of ecotype, drought stress, salicylic acid, and silicon significantly affected the content of ion leakage, gas exchange, and water relations at a significance level ($p \leq 0.01$). However, it did not have a significant effect on the protein content. The findings indicate that the Abdanan ecotype exhibited the greatest ion leakage content at 50% agricultural capacity. The Ilam ecotype demonstrated the lowest and highest protein content at the control treatment and 50% agricultural capacity with salicylic acid (ppm 100), respectively.

Additionally, the Ilam ecotype of the control treatment and the Abadanan ecotype of 50% agricultural capacity displayed the lowest and highest sub-stomatal carbon dioxide

concentration, respectively. The study examined the effects of salicylic acid (100 ppm) and silicon (1 g/L) treatments on various parameters in different ecotypes. The Abadanan ecotype of the control treatment with silicon (1g/L) and the Ilam ecotype with 50% agricultural capacity was analyzed for their lowest and highest mesophilic conductivity. The Ilam ecotype with 50% agricultural capacity and silicon treatment and the Ilam ecotype control treatment were evaluated for their lowest and highest transpiration rates. The Abadanan ecotype of the control treatment with silicon (1 g/L) and the Ilam ecotype of 50% crop capacity with salicylic acid (100 ppm) and silicon (1 g/L) treatment was assessed for their lowest and highest efficiency of water consumption. Additionally, the study investigated the impact of drought stress on the thickness of epidermal cells, mesophyll cells, xylem diameter, and Phloem. The results indicated a significant decrease in these indicators in the Ilam ecotype compared to the control sample.

Conclusion

Drought stress reduced photosynthesis, gas exchange parameters, morphological alterations, and ion leakage in flowering plants in this study. Silicone usage raised the relative moisture content. Treating salicylic acid (ppm 100) and silicon (1g/liter) simultaneously reduced drought stress damage while increasing photosynthesis and gas exchange parameters. Furthermore, salicylic acid and silicon, which favorably influence plant structure, can improve floral morphological indices under drought stress conditions.

Keywords: Anatomy, Salicylic Acid, Drought Stress, Silicon, Physiological Index, *Scrophularia striata* L.

کاربرد اسید سالیسیلیک و سیلیکون بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و ریخت‌شناسی در دو اکوتیپ گیاه گل سازویی (*Scrophularia striata* L.) در شرایط تنش خشکی

فریبا شوهانی^۱، آرش فاضلی^{۱*} ID، سیاوش حسینی سرقین^۱

^۱ گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

چکیده

در عصر حاضر، کمبود آب از چالش‌های اصلی زیست‌محیطی برای گیاهان است که به اختلالات متابولیکی و فیزیولوژیکی منجر می‌شود و در سال‌های اخیر شایان توجه محققان قرار گرفته است. اسید سالیسیلیک و سیلیکون به‌عنوان دو تعدیل‌کننده تنش خشکی در گیاهان شناخته شده‌اند. پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی تنش خشکی بر شاخص‌های فیزیولوژیکی و ریخت‌شناسی گل سازویی برای معرفی در مناطق خشک در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در دانشگاه ایلام انجام شد. در این پژوهش تنش خشکی در دو سطح (۵۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، اسید سالیسیلیک (SA) در دو سطح (صفر و ۱۰۰ ppm)، سیلیکون (Si) در دو سطح (۰ و ۱ گرم در لیتر) و نیز دو اکوتیپ (ایلام و آبدانان) بر صفات فتوسنتز، پارامترهای تبادل گازی، محتوی رطوبت نسبی برگ، پروتئین کل و شاخص‌های ریخت‌شناسی گل سازویی بررسی شدند. نتایج حاصل از این آزمایش نشان دادند تنش خشکی باعث کاهش محتوی رطوبت نسبی برگ، پروتئین کل، فتوسنتز، پارامترهای تبادل گازی و افزایش نشت یونی شد. همچنین از لحاظ ساختاری کاهش عرض روزنه، عرض سلول‌های نگهبان روزنه، تراکم روزنه در واحد سطح و قطر بافت‌های آوندی را موجب شد. کاربرد اسید سالیسیلیک و سیلیکون باعث بهبود فتوسنتز، پارامترهای تبادل گازی، رطوبت نسبی و پروتئین کل در اندام هوایی شد. همچنین محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و سیلیکون به بهبود شاخص‌های ریخت‌شناسی ناشی از تنش خشکی منجر شد. نتایج کلی نشان دادند تنش خشکی اثرات منفی بر گیاه گل سازویی دارد و کاربرد اسید سالیسیلیک و سیلیکون می‌تواند تحمل تنش خشکی در گیاه را بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: آناتومی، اسید سالیسیلیک، تنش خشکی، سیلیکون، گل سازویی



مقدمه

تنش خشکی یکی از فاکتورهای اساسی محدودکننده تولیدات کشاورزی است؛ به طوری که بیش از ۴۵ درصد از زمین‌های کشاورزی به طور دائم در معرض خطر خشکسالی‌اند و ۳۸ درصد جمعیت جهان در این مناطق ساکن‌اند. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهند پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاهان به تنش خشکی به فاکتورهای متعددی همچون گونه، منطقه، مدت زمان تنش و مرحله رشدی گیاه بستگی دارد (Kordrostami et al., 2020). کمبود آب یک تنش غیرزنده چندبعدی و مخرب است که عملکرد متابولیک مانند کیفیت محصول و بهره‌وری را از طریق فرایندهای فیزیولوژیکی و ریخت‌شناسی تغییر می‌دهد (Akman et al., 2020; Bhardwaj, 2021). به طور کلی فرض می‌شود علت اصلی کاهش فتوسنتز، بسته‌شدن روزنه و کاهش دسترس بودن دی‌اکسیدکربن در مزوفیل برگ باشد و این شواهد قوی نشان می‌دهند خشکسالی بر متابولیسم و ساختار مزوفیل نیز تأثیر می‌گذارد (Akman et al., 2020; Bhardwaj, 2021). بررسی اثر تنش خشکی بر طول و عرض، تراکم روزنه و عرض سلول‌های نگهبان روزنه کاهش معنی‌دار این شاخص‌ها را نشان داد. این صفات مورفولوژیکی به طور چشمگیری بر تبادلات گازی و فرایند فتوسنتز نقش کلیدی دارند (Xu et al., 2008; Bertolin, 2019; Lerthgin et al., 2022). یکی از اساسی‌ترین تغییرات ناشی از تنش خشکی، کاهش محتوی نسبی آب برگ (RWC) است که به‌عنوان شاخصی از سازگاری گیاهان به تنش

خشکی شایان توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Schonfeld et al., 1988). جنس *Scrophularia* یکی از بزرگ‌ترین جنس‌های خانواده *Scrophulariaceae* و شامل ۲۰۰ گونه از گیاهان گلدار است. گل سازویی *S. striata* با نام محلی تشنه‌داری از دیرباز به‌عنوان یک گیاه دارویی کاربرد داشته است. این گیاه در ایران و برخی از کشورها از جمله کره جنوبی و چین رویش دارد (Rostami et al., 2021; Rostami et al., 2022) و در طب سنتی برای درمان دستگاه گوارش، عفونت چشم و گوش و بیماری‌های تنفسی استفاده می‌شود (Kerdar et al., 2019). سال‌هاست مردمان غرب کشور این گیاه را به‌صورت آزمایشی و به اشکال بخور و خوراکی استفاده می‌کنند (Zargoosh et al., 2019). براساس مطالعات انجام‌شده روی ترکیبات شیمیایی و مواد مؤثره *Scrophularia striata* در سال‌های اخیر، ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی در عصاره اتانولی این گیاه شناسایی شده‌اند. همچنین منبع غنی دو متابولیت مهم ایلوئیدها و گلیکوزیدهای فنیل پروپانوئید است (Kerdar et al., 2019; Rostami et al., 2022). اسید سالیسیلیک (SA) یک فنل گیاهی است که به‌عنوان یک تنظیم‌کننده درون‌زا مکانیسم دفاعی در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده دارد و در جذب مواد مغذی، پایداری غشا و روابط آب، تنظیم روزنه، فتوسنتز و مهار بیوسنتز اتیلن نقش دارد (Dianat et al., 2016). کاربرد سیلیکون (Si) در غلظت ۰/۱ گرم باعث بهبود ساختارهای غشایی، آوندی و مزوفیلی شد (Bhardwaj et al., 2021). سیلیکون

۱۳۹۹ از دو منطقه ایلام و آبدانان واقع در غرب رشته‌کوه‌های زاگرس با اقلیم معتدل و کوهستانی و گرم و خشک و با وضعیت جغرافیایی ۴۷ درجه ۲۵ دقیقه عرض شمالی ۳۲ درجه و ۵۹ دقیقه طول شرقی با ارتفاع ۸۸ متر از سطح دریا و همچنین ۲۳ درجه ۲۱ دقیقه ۳۰ ثانیه عرض شمالی ۴۶ درجه ۵۱ دقیقه و ۱۹ ثانیه طول شرقی با ارتفاع ۱۴۲۷ متر از سطح دریا، جمع‌آوری و سپس ویژگی‌های گیاه‌شناسی نمونه‌های بررسی شده براساس *Flora Iranica* تأیید شدند. بذرها جمع‌آوری شده با کد دسترسی (IUGB02076) در بانک ژن دانشگاه ایلام نگهداری می‌شوند. برای ضدعفونی بذور از هیپوکلرید سدیم ۱۰ درصد به مدت ۳۰ ثانیه استفاده شد و سپس با آب مقطر سه بار شستشو داده شدند. برای از بین بردن خفتگی بذرها با محلول ۴۰۰ ppm جیبرلین به مدت ۴۸ ساعت تیمار و جوانه‌دار شدند. پتری‌دیش محتوی بذرها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰ درصد در دستگاه ژرمیناتور (مدل KBWF 240، ساخت شرکت GERMANY) قرار داده شد. بعد از ۴۸ ساعت بذرها در پتری‌دیش‌های حاوی کاغذ مرطوب در دستگاه ژرمیناتور قرار داده شدند. نهال‌های جوانه‌زده در گلدان‌های کاغذی کوچک حاوی خاک + کود آلی + رس و با خصوصیات فیزیکوشیمیایی هدایت الکتریکی (EC) ۱/۳ میکروموس بر سانتی‌متر، pH=۷/۴، رطوبت ۲۸ درصد و نسبت N: P: K به ترتیب ۲۴۰: ۹/۴: ۰/۰۱ به گلخانه انتقال داده شدند و به مدت ۳۰ روز تحت مراقبت لازم قرار گرفتند. گیاهچه‌های رشد یافته از هر دو اکوتیپ به گلدان‌های با عمق ۱۲ و قطر ۱۸ سانتی‌متر منتقل شدند.

(Si) دومین عنصر فراوان در خاک پس از اکسیژن است (Bhardwaj *et al.*, 2021). سیلیکون یک ریزمغذی ضروری برای گیاهان در نظر گرفته نشده است؛ اما اثرات مفید آن روی رشد و توسعه گیاهان توسط بسیاری از مطالعات ثابت شده است (Kafi *et al.*, 2011). کاربرد سیلیکون به افزایش آنزیم رویسکو کربوکسیلاز و در نهایت به افزایش فعالیت فتوسنتزی در گیاهان تحت تنش خشکی منجر می‌شود (Seal *et al.*, 2018). تاکنون مطالعه‌ای در خصوص اثرات همزمان اسید سالیسیلیک و سیلیکون در بهبود پاسخ‌های ریخت‌شناسی گیاه دارویی گل سازویی در معرض تنش خشکی انجام نشده است. با توجه به اهمیت اقتصادی و نیاز روزافزون جامعه به مصرف گیاهان دارویی، افزایش سطح زیرکشت این محصولات بیش‌ازپیش ضرورت دارد؛ اما شرایط اقلیمی ما اجازه افزایش کشت آنها را در شرایط کم‌آبی نمی‌دهد؛ بنابراین، پژوهش‌های روبه‌رشدی در این زمینه در حال شکل‌گیری هستند که تلاش می‌کنند با سازوکارهای مخصوص و ایجاد شرایط خاص به افزایش سطح زیرکشت آنها در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک کنند؛ بنابراین، پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تغییرات ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی گیاه گل سازویی تحت تنش خشکی و نقش اسید سالیسیلیک و سیلیکون در کاهش اثرات منفی تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

ماده گیاهی و شرایط رشد

بذرها از دو اکوتیپ گیاه گل سازویی در دی ماه

تیمارها و طراحی آزمایش

به منظور بررسی بازخورد گیاهان به تنش خشکی تحت تیمار سیلیکون و اسید سالیسیلیک، آزمایشی در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام در سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام گرفت. در این آزمایش اسید سالیسیلیک و سیلیکون با فرمول‌های مولکولی $C_7H_6O_3$ و K_2SiO_3 از شرکت مرک آلمان خریداری شدند. برای تهیه محلول اسید سالیسیلیک، مقدار ۰/۱ گرم اسید سالیسیلیک در ۰/۵ میلی‌لیتر اتانول حل شد و قطره‌قطره به آب مقطر، اضافه و سیلیکون نیز در آب گرم (۶۰ درجه) حل شد تا غلظت‌های مدنظر به دست آیند. ۱۲۷ روز بعد از کاشت و زمانی که گیاهان در مرحله چهار تا پنج برگگی بودند، اعمال تیمار شروع شد. در این آزمایش براساس نتایج منابع تنش خشکی در دو سطح (۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، اسید سالیسیلیک در دو سطح (۰ و ۱۰۰ ppm) و سیلیکون در دو سطح (۰ و ۱ گرم در لیتر) اعمال شد (Bazi Zelan *et al.*, 2022; Shohani *et al.*, 2023). اسید سالیسیلیک و سیلیکون به صورت محلول پاشی در اوایل صبح انجام گرفت؛ به طوری که شاخ و برگ گیاه را به طور کامل پوشش دهد و هشت بار در چهار هفته تکرار شد. دو روز بعد از محلول پاشی اعمال تنش خشکی در دو سطح (۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) به مدت ۵۰ روز انجام شد. نمونه برداری بعد از ۱۷۷ روز از زمان کاشت در ساعت زمانی ۱۱ صبح تا ۲ عصر انجام شد. بعد از ۱۹۸ روز گیاهان از سطح بالای خاک بین ساعت ۸ تا ۱۱ صبح برداشت شدند. همچنین ظرفیت زراعی با

استفاده از روش Dahiya و همکاران (۱۹۷۹) و از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$FC = \frac{FW-DW}{DW} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

FC: ظرفیت زراعی، DW: وزن خشک، FW: وزن مرطوب خاک

اندازه‌گیری فیزیولوژیکی

سنجش محتوی رطوبت نسبی برگ

به منظور سنجش محتوی رطوبت نسبی برگ از روش (Diaz Perez *et al.*, 1995) استفاده شد. در ابتدا برگ‌های میانی که موقعیت رشد یکسانی داشتند، انتخاب و از بوته جدا شدند و نمونه‌ها بلافاصله به محیط آزمایشگاه برای توزین انتقال داده شدند. در هر تیمار سه تکرار توسط ترازوی دیجیتال (مدل SARTORIUS، ساخت شرکت آلمان) و با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شدند (وزن تر). سپس نمونه‌ها در لوله‌های فالدکون‌دار در بسته با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. بعد از این مرحله نمونه‌ها روی دستمال کاغذی برای خشک شدن سطحی گذاشته و دوباره وزن شدند (وزن اشباع). بعد از آن، نمونه‌ها در بسته‌های کاغذی کوچک قرار گرفتند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در داخل دستگاه آون (مدل Schutzart، ساخت شرکت آلمان) قرار داده و سپس مجدداً وزن شدند (وزن خشک). از رابطه زیر محتوی رطوبت نسبی سنجش شد.

$$RWC = \frac{WF-WD}{WT-WD} \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

RWC: رطوبت نسبی برگ، WT: وزن تر، WD: وزن خشک و TW: وزن اشباع

نشت یون

به منظور تعیین نشت یونی، برگ‌هایی انتخاب و از بوته جدا شدند که موقعیت رشد یکسانی داشتند و به محیط آزمایشگاه منتقل شدند. در ابتدا نمونه‌های مدنظر با آب مقطر، شسته و در ۵ میلی‌لیتر آب مقطر در لوله‌های فالكون‌دار در بسته، روی شیکر قرار داده شدند. سپس EC اولیه (Ci) در تماس با نمونه‌ها با دستگاه EC متر (مدل GLP31، ساخت شرکت CRISON) خوانده شد. نمونه‌ها بلافاصله در حمام آب جوش به مدت نیم‌ساعت قرار داده شدند. سپس EC ثانویه (CM) نمونه‌ها نیز خوانده شد. میزان هدایت الکتریکی از رابطه ۳ محاسبه شد (Blum *et al.*, 1981).

$$EL = \left(\frac{Ci}{CM}\right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

سنجش پروتئین محلول

به منظور سنجش میزان پروتئین کل از روش Lowry و همکاران (۱۹۵۱) با کمی تغییرات استفاده شد؛ به این ترتیب که به ۰/۱ گرم از بافت خشک، ۲ میلی‌لیتر بافر تریس - اسید کلریدریک ۰/۲ نرمال با pH=۸ (محتوی تریس ۰/۲ نرمال، اسید آسکوربیک ۰/۰۵ میلی‌مولار و ساکاروز ۵۰ میلی‌مولار) اضافه شد. مخلوط بافر با بافت برگ به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس محلول رویی به مدت ۲۰ دقیقه در دور ۴۰۰۰ سانتریفیوژ شد. به ۰/۵ میلی‌لیتر از روشناور که حاوی پروتئین محلول بود، ۲ میلی‌لیتر معرف سولفات مس اضافه شد. پس از ۱۰ دقیقه، ۱ میلی‌لیتر معرف فولین سیوکالتیو رقیق شده با نسبت ۹:۱ اضافه شد. سپس ۳۰ دقیقه در محیط

تاریک قرار داده شدند. در پایان، جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۶۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر (مدل SPEECORD 50 n، ساخت شرکت آلمان) خوانده شد. میزان پروتئین با استفاده از نمودار استاندارد از غلظت‌های مختلف آلبومین سرم گاوی محاسبه می‌شود.

تبادل گازی و روابط آب

به منظور اندازه‌گیری سرعت فتوسنتز در واحد سطح برگ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)، غلظت دی‌اکسید کربن زیرروانه‌ای ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)، تعرق ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)، هدایت مزوفیلی ($\mu\text{mol H}_2\text{O ms}^{-2} \text{ s}^{-1}$) و کارایی مصرف آب (نسبت فتوسنتز خالص به تعرق) از دستگاه فتوسنتز متر (RGA4 مدل LCA4، ساخت شرکت کره) استفاده شد. سنجش در بازه زمانی ۹ صبح تا ۱ بعدازظهر انجام شد. به منظور جلوگیری از بروز تنش در گیاهان، اعمال آبیاری انجام شد. در هر تیمار صفات مدنظر، اندازه‌گیری و ۴۵ ثانیه بعد از قراردادن برگ داخل محفظه شیشه‌ای دستگاه، اعداد ثبت شدند (Fischer *et al.*, 1998; Akman *et al.*, 2020).

صفات ریخت‌شناسی روزنه

به منظور آماده‌سازی نمونه آناتومیکی روزنه از روش Akman و همکاران (۲۰۲۰) با کمی تغییرات استفاده شد؛ بنابراین، ابتدا برگ‌های میانی بوته بر مبنای سه تکرار در هر تیمار، انتخاب و از بوته جدا شدند. سپس با یک لاک بی‌رنگ سطح رویی برگ پوشانده شد، یک چسب نواری روی محل

مدنظر گذاشته و کاملاً منبسط و فشار داده شد. بعد از ۶۰ ثانیه چسب نواری حاوی بافت اپیدرمی از برگ، جدا و روی لام تمیز مدنظر گذاشته شد. روزنه‌های سطح رویی برگ با میکروسکوپ (مدل Olympus-cy، ساخت شرکت ژاپن) تصویربرداری شدند. تجزیه و تحلیل تصویر با استفاده از نرم‌افزار image انجام شد و برای صفات، طول و عرض روزنه، اندازه روزنه (طول × عرض)، عرض سلول محافظ نگهبان روزنه و تراکم روزنه (تعداد روزنه در واحد سطح) محاسبه شدند.

تحلیل آماری

آزمایش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۴ انجام شد و مقادیر میانگین و خطای استاندارد از سه تکرار محاسبه شدند. مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از روش LSD در سطح آماری ۵ درصد انجام شد و برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار گراف پد نسخه ۹ استفاده شد.

نتایج

محتوی نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهند تنش خشکی بر محتوی نسبی آب در هر دو اکوتیپ تأثیر معنی‌دار داشت؛ ولی اثرات متقابل چهارگانه اکوتیپ * تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون اثر معنی‌دار بر محتوی رطوبت نسبی آب برگ نداشت؛ اما اثرات متقابل سه‌گانه اکوتیپ * تنش * اسید سالیسیلیک و اکوتیپ * تنش * سیلیکون اثر معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بر محتوی نسبی آب برگ داشت. مقایسه میانگین نشان می‌دهد کمترین و بیشترین محتوی نسبی آب برگ در اکوتیپ ایلام تیمار شاهد * اسید سالیسیلیک (۱۰۰ppm) * سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) و اکوتیپ آبدانان تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) مشاهده شد (شکل ۱ و جدول ۱).

صفات ریخت‌شناسی برگ
برای آماده‌سازی نمونه میکروسکوپی برگ از روش Jafarian و همکاران (۲۰۱۳) استفاده شد. در ابتدا برگ میانی سالم بوته، انتخاب و از بوته جدا شد. به‌منظور تهیه مقاطع میکروسکوپی نمونه‌ها بلافاصله در فرمالین ۱۰ درصد به مدت دو روز قرار گرفتند. برای جلوگیری از تاخوردگی برگ در محلول مدنظر برگ‌ها روی کاغذ منگنه شدند. سپس نمونه‌ها با محلول‌های مختلف اتانول، آبگیری و در نهایت دو بار در داخل محلول گزیلول خالص قرار داده شدند. برای پارافین‌گیری، نمونه‌ها طی دو مرحله در پارافین خالص قرار گرفته و بلوک‌های پارافین حاوی نمونه تهیه شدند. برای تعیین صفات بررسی‌شده، برش‌های میکروتومی با ضخامت ۷ میکرومتر با دستگاه میکروتوم (مدل Panand-P1215) ساخت شرکت (ایران) انجام شد. نمونه‌ها برای مشاهده بهتر با محلول‌های رنگی هماتوکسلین و ائوزین رنگ‌آمیزی شدند. آنالیز با میکروسکوپ (مدل Olympus-cy، ساخت شرکت ژاپن) و تجزیه و

صفات ریخت‌شناسی برگ

برای آماده‌سازی نمونه میکروسکوپی برگ از روش Jafarian و همکاران (۲۰۱۳) استفاده شد. در ابتدا برگ میانی سالم بوته، انتخاب و از بوته جدا شد. به‌منظور تهیه مقاطع میکروسکوپی نمونه‌ها بلافاصله در فرمالین ۱۰ درصد به مدت دو روز قرار گرفتند. برای جلوگیری از تاخوردگی برگ در محلول مدنظر برگ‌ها روی کاغذ منگنه شدند. سپس نمونه‌ها با محلول‌های مختلف اتانول، آبگیری و در نهایت دو بار در داخل محلول گزیلول خالص قرار داده شدند. برای پارافین‌گیری، نمونه‌ها طی دو مرحله در پارافین خالص قرار گرفته و بلوک‌های پارافین حاوی نمونه تهیه شدند. برای تعیین صفات بررسی‌شده، برش‌های میکروتومی با ضخامت ۷ میکرومتر با دستگاه میکروتوم (مدل Panand-P1215) ساخت شرکت (ایران) انجام شد. نمونه‌ها برای مشاهده بهتر با محلول‌های رنگی هماتوکسلین و ائوزین رنگ‌آمیزی شدند. آنالیز با میکروسکوپ (مدل Olympus-cy، ساخت شرکت ژاپن) و تجزیه و

نشت یونی

زراعی ۵۰ درصد و اکوتیپ ایلام تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * اسید سالیسیلیک (۱۰۰ ppm) مشاهده شد (شکل ۱ و جدول ۱).

تبادل گازی و روابط آب

در این مطالعه تنش خشکی بر فتوسنتز در هر دو اکوتیپ اثر معنی‌دار داشت؛ ولی اثرات متقابل تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون معنی‌دار نبود؛ اما اثرات متقابل چهارگانه اکوتیپ * تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون در سطح احتمال (P≤۰/۰۱) اثر معنی‌دار داشت. نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهند کمترین میزان سرعت فتوسنتز در اکوتیپ ایلام * تیمار کنترل * ظرفیت زراعی ۵۰ درصد و اکوتیپ آبدانان تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) مشاهده شد؛ اما اختلاف بین آنها معنی‌دار نبود و بیشترین آن در اکوتیپ ایلام تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * اسید سالیسیلیک (۱۰۰ ppm) * سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) مشاهده شد. تنش خشکی بر محتوی دی‌اکسیدکربن زیرروانه‌ای در اندام هوایی در هر دو اکوتیپ تأثیر داشت. اثرات متقابل چهارگانه اکوتیپ * تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون در سطح احتمال (P≤۰/۰۵) اثر معنی‌دار بر غلظت دی‌اکسیدکربن در اندام هوایی داشت. مقایسه میانگین نشان می‌دهد کمترین و بیشترین میزان غلظت دی‌اکسیدکربن زیرروانه‌ای به‌ترتیب در اکوتیپ ایلام تیمار شاهد و اکوتیپ آبدانان تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * اسید سالیسیلیک (۱۰۰ ppm) * سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) مشاهده شد. تنش خشکی اثرات معنی‌دار بر هدایت

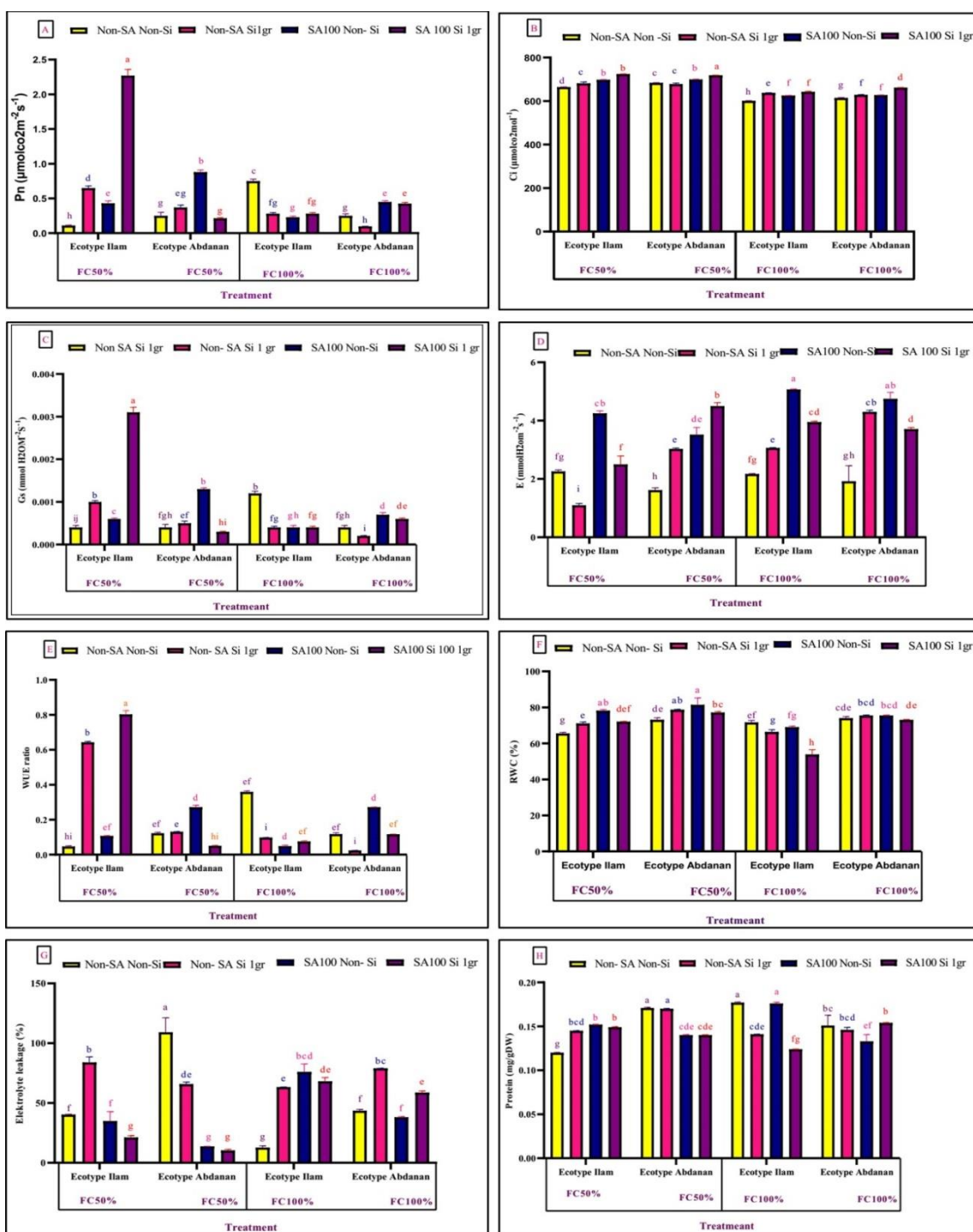
تنش خشکی اثرات معنی‌داری بر محتوی نشت یونی در برگ دو اکوتیپ داشت. محلول‌پاشی با اسید سالیسیلیک بر محتوی نشت یونی تأثیر معنی‌داری نداشت؛ اما اثرات متقابل چهارگانه اکوتیپ * تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون تأثیر معنی‌دار (P≤۰/۰۱) بر محتوی نشت یونی داشت. مقایسه میانگین نشان می‌دهد کمترین محتوی نشت یونی در اکوتیپ آبدانان تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * اسید سالیسیلیک (۱۰۰ ppm) و اکوتیپ ایلام تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * اسید سالیسیلیک * سیلیکون و اکوتیپ آبدانان تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * اسید سالیسیلیک * سیلیکون مشاهده شد؛ اما بین آنها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و بیشترین محتوی نشت یونی در اکوتیپ آبدانان تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد (شکل ۱ و جدول ۱).

سنجش پروتئین محلول

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهند تنش خشکی بر محتوی پروتئین در هر دو اکوتیپ در اندام هوایی تأثیر معنی‌دار داشت؛ اما اثرات چهارگانه اکوتیپ * تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون بر محتوی پروتئین کل در اندام هوایی معنی‌دار نبود. اثرات متقابل سه‌گانه اکوتیپ * تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون و اکوتیپ * تنش خشکی * سیلیکون در سطح احتمال (P≤۰/۰۱) معنی‌دار بود. مقایسه میانگین نشان می‌دهد کمترین و بیشترین محتوی پروتئین در اکوتیپ ایلام تیمار شاهد * ظرفیت

ایلام تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی * سیلیکون و اکوتیپ ایلام تیمار شاهد * اسید سالیسیلیک مشاهده شد. خشکی تأثیر معنی‌دار بر میزان کارایی مصرف آب در اندام هوایی در هر دو اکوتیپ داشت. محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک تأثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب نداشت؛ اما اثرات متقابل چهارگانه اکوتیپ * تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون اثر معنی‌دار ($P \leq 0/01$) بر کارایی مصرف آب در اندام هوایی داشت. مقایسه میانگین نشان می‌دهد کمترین و بیشترین کارایی مصرف آب در اکوتیپ آبدانان تیمار شاهد * سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) و اکوتیپ ایلام تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * اسید سالیسیلیک (ppm ۱۰۰) * سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) مشاهده شد (شکل ۱ و جدول ۱).

مزوفیلی در هر دو اکوتیپ داشت. اثرات متقابل چهارگانه اکوتیپ * تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون در سطح احتمال ($P \leq 0/01$) اثر معنی‌دار بر هدایت مزوفیلی اندام هوایی داشت. مقایسه میانگین نشان می‌دهد کمترین و بیشترین هدایت مزوفیلی در اکوتیپ آبدانان تیمار شاهد سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) و اکوتیپ ایلام تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * اسید سالیسیلیک (ppm ۱۰۰) * سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) مشاهده شد. تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر میزان تعرق در اندام هوایی در هر دو اکوتیپ داشت؛ اما اثرات متقابل چهارگانه اکوتیپ * تنش خشکی * اسید سالیسیلیک * سیلیکون اثر معنی‌دار ($P \leq 0/05$) بر تعرق اندام هوایی داشت. مقایسه میانگین نشان می‌دهد کمترین و بیشترین میزان تعرق در اکوتیپ



شکل ۱- محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و سیلیکون بر سرعت فتوسنتز (A)، دی‌اکسید کربن زیرروانه‌ای (B) هدایت مزوفیلی (C)، تعرق، (D) کارایی مصرف آب (E)، رطوبت نسبی (F)، نشت یونی (G) و پروتئین کل (H) در اندام هوایی گل سازویی در شرایط تنش خشکی (ظرفیت مزرعه‌ای ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد) داده‌ها، میانگین سه تکرار ± خطای آزمایشی هستند. حروف کوچک نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری در سطح $P \leq 0.05$ هستند.

Figure 1- Foliar spraying of salicylic acid and silicon on photosynthesis rate (A), substomatal carbon dioxide (B), mesophyll conductance (C), transpiration, (D) water use efficiency (E), relative humidity (F), ion leakage (G) and total protein (H) in areal shoot of *S. striata* under drought stress conditions (FC50% and FC100%) Data, are mean of three replicates ± SE. Lowercase letters indicate significant differences at the $P \leq 0.05$ level

جدول ۱- تجزیه واریانس: فتوسنتز (P_N)، غلظت دی‌اکسید کربن زیرروزنه‌ای (Ci)، هدایت روزنه‌ای (gs)، محتوی نسبی آب (RWC)، نشت یونی (EC)، تعرق (Tr)، کارایی مصرف آب (WUE)، پروتئین کل اندام هوایی (Tpro) در اندام هوایی گیاه گل‌سازویی در شرایط تنش خشکی

Table 1- variance ANOVA: Net photosynthetic rate (P_N), substomatal CO_2 concentration (Ci), stomatal conductance to CO_2 (gs), RWC (relative water content), El (Electrolyte leakage), Tr (transpiration), WUE (water use efficiency) SPro (total shoot protein) in aerial shoot of *S. striata* L. under drought stress conditions

مجموع میانگین مربعات

دامنه تغییرات	درجه آزادی	P_n ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Ci ($\mu\text{mol CO}_2\text{mol}^{-1}$)	Gs ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	WUE (ratio)	Tr ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	RWC (%)	EC (%)	T Pro (mg/gDW)
اکوتیپ	۱	۰/۸۰۲۹**	۲۷۰/۵۱۵**	۰/۰۰۰۱۶۶**	۰/۳۰۴۱**	۱/۶۸**	۶۹۵/۲۸**	۵۸/۹۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۷۵ ^{ns}
تنش	۱	۱/۰۷۷۶**	۴۸۵۹۹/۹۵**	۰/۰۰۰۱۵۷۹۴**	۰/۳۰۰۳**	۷/۰۹**	۲۷۵/۱۱**	۶۸۱/۰۵۱**	۰/۰۰۰۳۴ ^{ns}
اسید سالیسیلیک	۱	۱/۱۰۷۳**	۸۱۸۳/۶۵**	۰/۰۰۰۱۹۲۲۹**	۰/۰۰۰۰۵۶۷ ^{ns}	۳۰/۶**	۳/۴۹۱ ^{ns}	۵۸۵۵/۲**	۰/۰۰۰۵۵۳**
سیلیکون	۱	۰/۲۸۳**	۴۷۷۷/۰۲**	۰/۰۰۰۳۹۳۵**	۰/۱۱۸**	۰/۰۶۳ ^{ns}	۸۱/۶۷**	۱۲۶۳/۳**	۰/۰۰۰۴۷**
تنش * اکوتیپ	۱	۰/۳۷۵**	۳۷/۷۱*	۰/۰۰۰۶۱۵**	۰/۱۱۲**	۰/۰۸۶۱**	۳۳/۸۴*	۷۰/۵۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۱۴**
اسید سالیسیلیک * اکوتیپ	۱	۰/۰۳۱۴**	۲/۹۷۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱۵۹ ^{ns}	۰/۰۰۹۷۶**	۰/۴۶۴*	۱۰/۴۷ ^{ns}	۵۸۵۰/۲**	۰/۰۰۰۱۵۴**
سیلیکون * اکوتیپ	۱	۱/۳۵۶**	۲۳۶/۰۷**	۰/۰۰۰۲۵۳**	۰/۳۲۷**	۰/۸۳۲**	۸۶/۱۴**	۷۴۷/۰۶**	۰/۱۲۷**
اسید سالیسیلیک * تنش	۱	۱/۰۸۳۶**	۶۰۶/۶۹**	۰/۰۰۰۱۱۳۷**	۰/۰۶۲**	۰/۰۹۹ ^{ns}	۲۴۹/۵۹**	۱۲۸۴۷/۰۱**	۰/۰۰۰۱۴ ^{ns}
سیلیکون * تنش	۱	۱/۰۹۵**	۴۰۰/۴۹**	۰/۰۰۰۲۳۹۲۵**	۰/۳۴۸**	۰/۵*	۹۱/۷۸**	۲۵۰۳/۹**	۰/۰۰۰۱۶۳**
سیلیکون * اسید سالیسیلیک	۱	۰/۲۵۱**	۲۵۳/۶۹**	۰/۰۰۰۰۵۰**	۰/۰۱۷**	۰/۸۱۶**	۲۲۹/۴۹**	۱۵۳۷/۵**	۰/۰۰۰۰۶ ^{ns}
اسید سالیسیلیک * تنش * سیلیکون	۱	۱/۱۷۴۳**	۲۴۸/۶۵**	۰/۰۰۰۰۲۵**	۰/۰۵۳**	۰/۴۳۸*	۸۱/۲۳**	۲۳/۱۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۲۱**
سیلیکون * تنش * اکوتیپ	۱	۱/۸۸۳**	۱۱۶/۴۰۷**	۰/۰۰۰۳۷۹**	۰/۵۳۷**	۲/۶۱**	۶۰/۴**	۱۵۲۰/۲۶**	۰/۰۰۰۳۲**
سیلیکون * تنش * اکوتیپ	۱	۰/۰۰۳**	۲۰۶/۸۷**	۰/۰۰۰۴۰۴۸۴**	۰/۰۵۸**	۳/۶۵**	۱۱/۱۴ ^{ns}	۵۸۰/۲۲**	۰/۰۰۰۲۵*
سیلیکون * اسید سالیسیلیک * تنش	۱	۱/۱۴۳۳ ^{ns}	۵۸۱/۳۶**	۰/۰۰۰۲۳۶۷	۰/۰۴۳**	۰/۲۸ ^{ns}	۱۲/۰۸ ^{ns}	۳۷۲۴/۹۵**	۰/۰۰۰۸۹**
سیلیکون * اسید سالیسیلیک * تنش * اکوتیپ	۱	۰/۵۳۹۳**	۱۰۳/۴*	۰/۰۰۰۸۸۶**	۰/۰۰۶۰۶**	۰/۴۵*	۳/۲۹ ^{ns}	۵۳۹/۸**	۰/۰۰۰۰۴ ^{ns}
خط آزمایشی	۳۲	۰/۰۰۳۲	۱۴/۲۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۹۶	۵/۰۸	۵۴/۸۷	۰/۰۰۰۴
دقت آزمایش	-	۱۱/۴۵	۰/۵۷	۱۱/۲۶	۹/۲۲	۹/۶۲	۳/۱۱	۱۴/۴۶	۴/۱۶

* و ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

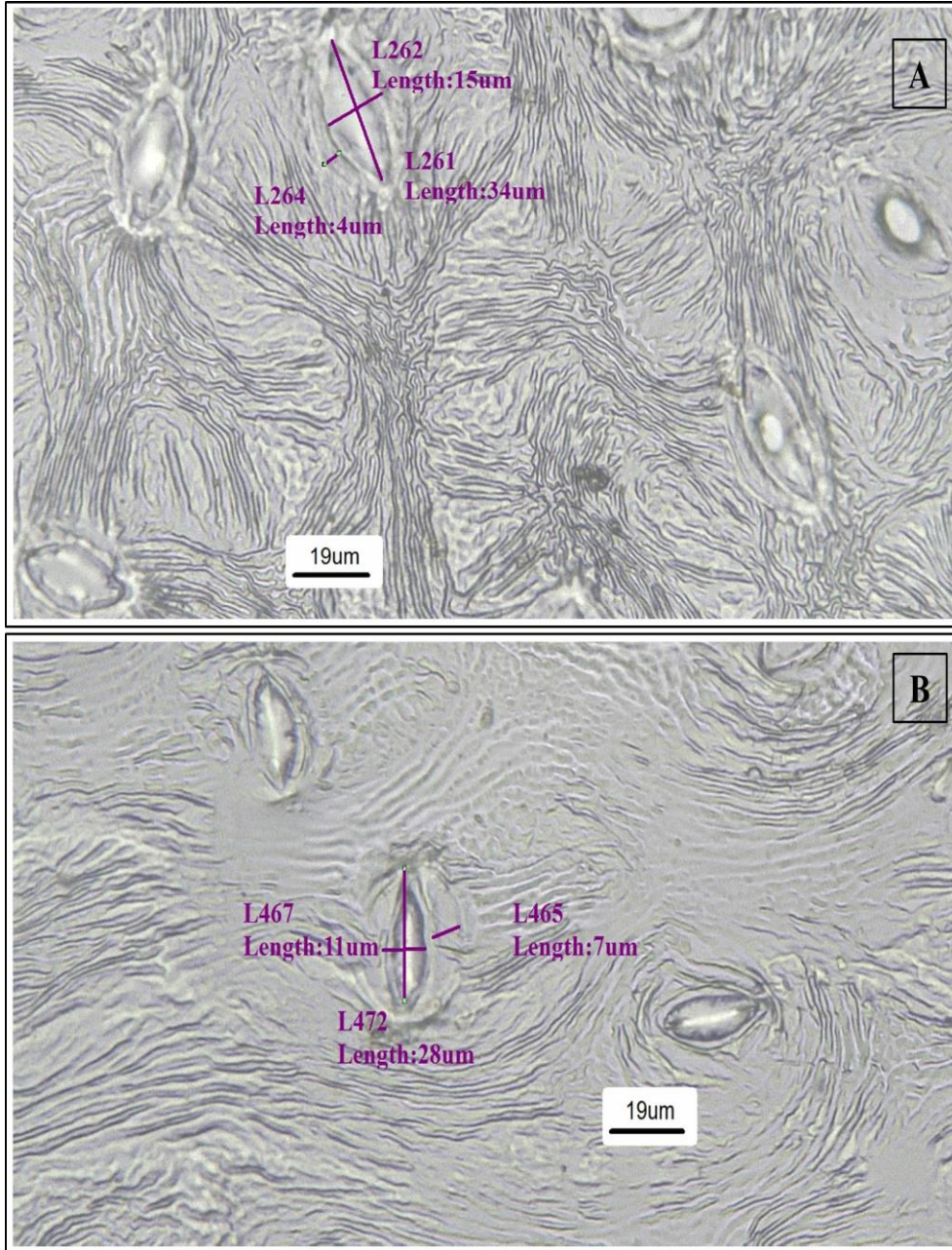
ns, * and ** show no significant and significant differences at 0.05, 0.01 probability level, respectively

شاخص‌های آناتومی

باعث افزایش این شاخص‌ها در اکوتیپ ایلام تحت تنش خشکی شد؛ اما افزایش اندازه روزنه در برگ با اطمینان ۹۵ درصد معنی دار نبود. بررسی اثر تنش خشکی بر ضخامت سلول‌های اپیدرمی، سلول‌های مزوفیلی، قطر آوند چوبی و آبکش کاهش معنی دار این شاخص‌ها را در اکوتیپ ایلام نسبت به نمونه شاهد نشان داد. محلول‌پاشی سیلیکون باعث کاهش ضخامت سلول‌های مزوفیلی گیاهان در شرایط تنش

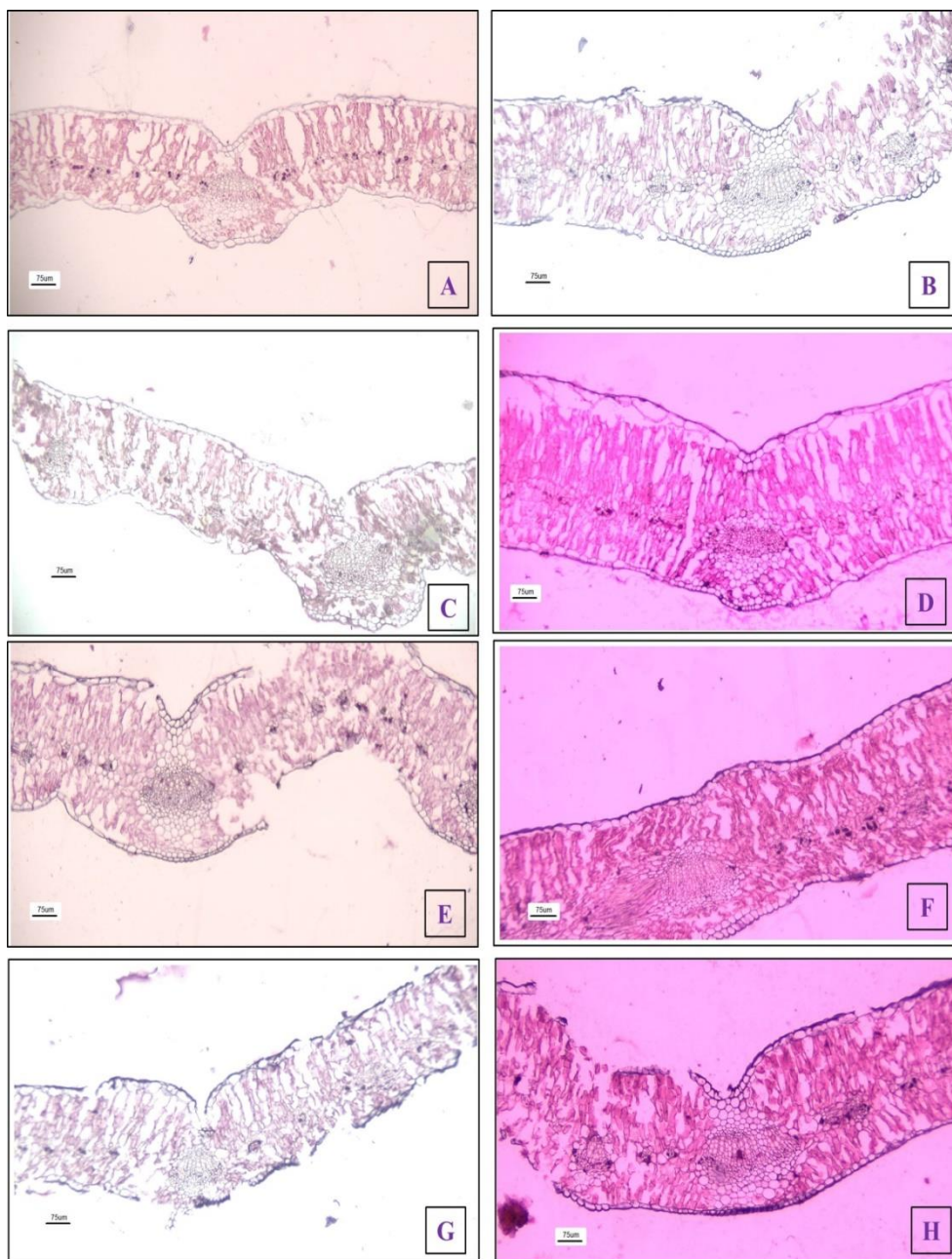
طول روزنه، عرض روزنه، عرض سلول‌های نگهبان روزنه و اندازه روزنه برگ در اکوتیپ ایلام تحت تنش خشکی نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش یافت؛ در حالی که کاهش عرض سلول‌های نگهبان روزنه در اکوتیپ آبدانان مطابق با داده‌های تجزیه واریانس (شکل ۲ و ۴ و جدول ۲) با اطمینان ۹۵ درصد معنی دار نبود. محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک

نسبت به شاهد شد؛ اما کاربرد همزمان اسید سالیسیلیک و سیلیکون باعث کاهش ضخامت سلول‌های اپیدرمی در اکوتیپ ایلام تیمار شاهد شد (شکل ۲، ۳، ۴ و ۵ و جدول ۲).



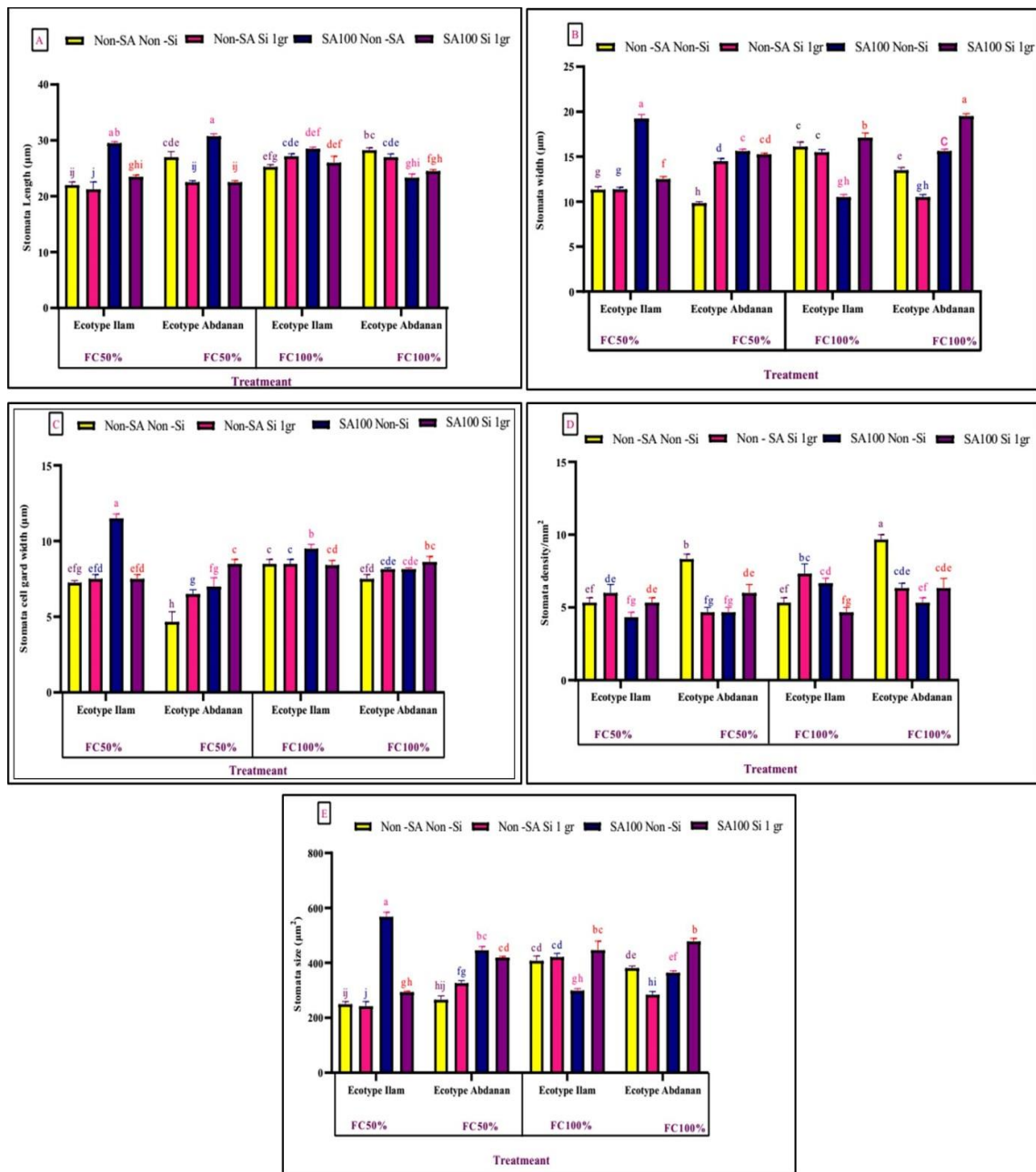
شکل ۲- اندازه LS (طول روزنه)، WS (عرض روزنه)، WG (عرض سلول‌های نگهبان روزنه) در سطح رویی برگ در گیاه گل سازویی در شرایط بدون تنش (A)، تنش خشکی (B)

Figure 2- The size of stoma length (LS), stoma width (WS), stoma guard cell width (WG) on the upper surface of the leaf in the flowering plant under no stress (A), drought stress (B)



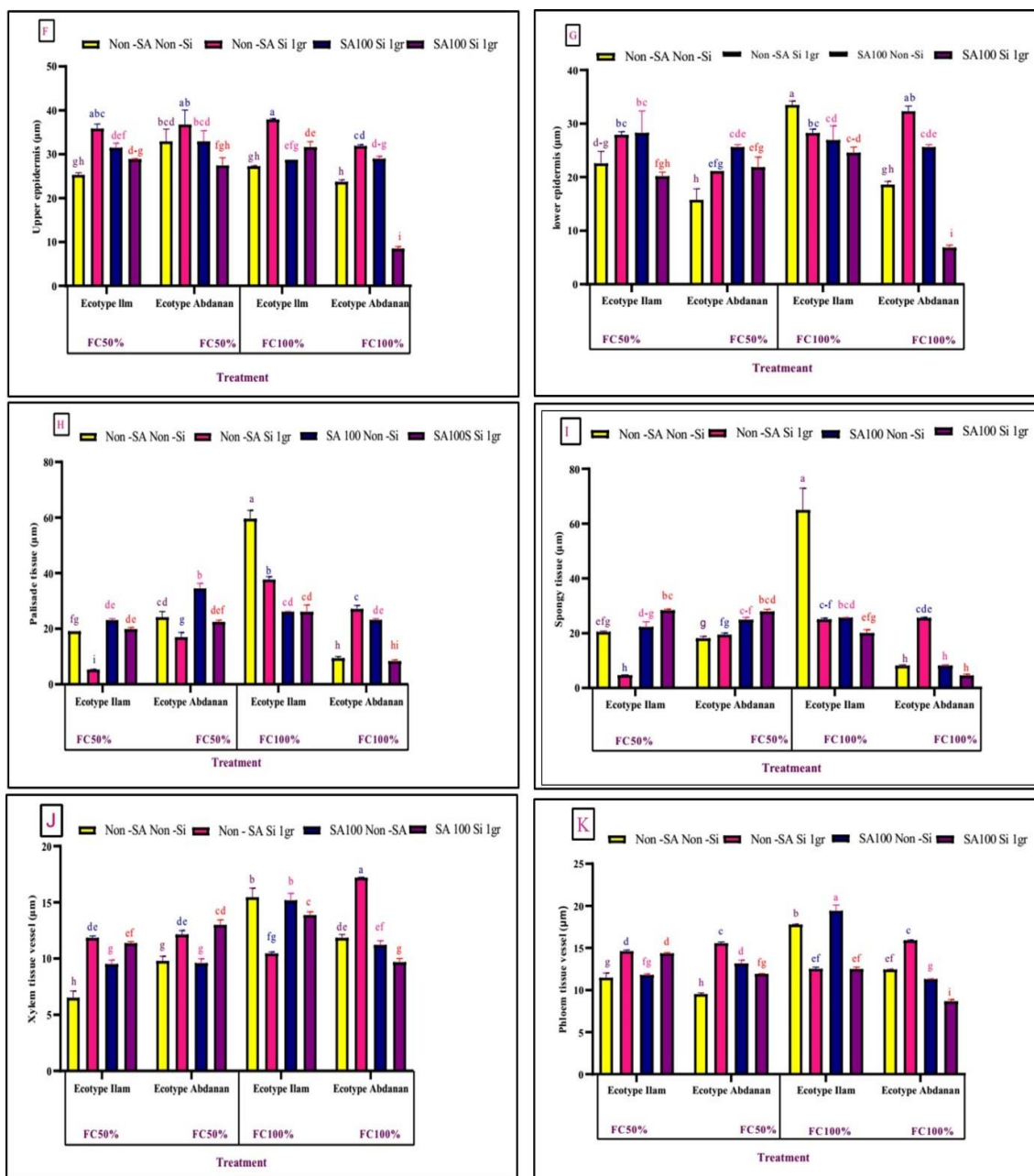
شکل ۳- تصاویر مقطع میکروسکوپی تغییرات آناتومیک برگ گیاه گل سازویی با بزرگنمایی ۴۰ شرایط کنترل (A)، شرایط تنش (B)، شرایط کنترل + اسید سالیسیلیک (C)، شرایط تنش + اسید سالیسیلیک (D)، شرایط کنترل + سیلیکون (E)، شرایط تنش + سیلیکون (F)، شرایط بدون تنش + اسید سالیسیلیک + سیلیکون (G)، شرایط تنش + اسید سالیسیلیک + سیلیکون (H)

Figure 3- Microscopic cross-section images of anatomical changes in the leaf of *Scrophularia striata* L with 40 magnification control conditions (A), stress conditions (B), control conditions + salicylic acid (C), stress conditions + salicylic acid (D), control conditions + silicon (E), stress condition + silicone (F), no stress condition + salicylic acid + silicone (G), stress condition + salicylic acid + silicone (H)



شکل ۴- کاربرد اسید سالیسیلیک بر طول روزنه (A)، عرض روزنه (B)، عرض سلول‌های نگهبان روزنه (C)، تراکم روزنه (D) و اندازه روزنه (E) داده‌ها، میانگین سه تکرار ± خطای آزمایشی هستند. حروف کوچک نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری در سطح $P \leq 0.05$ هستند.

Figure 4- Application of salicylic acid on stomatal length (A), stomatal width (B), stomatal guard cell width (C), stomatal density (D) and stomatal size (E). Data, are mean of three replicates ± SE. Lowercase letters indicate significant differences at the $P \leq 0.05$ level.



شکل ۵- تأثیر محلول پاشی اسید سالیسیلیک و سیلیکون بر شاخص‌های آناتومیکی سلول‌های اپیدرم فوقانی (A)، تحتانی (B)، سلول‌های مزوفیل نرده‌ای (C)، اسفنجی (D) و دستجات آوندی چوب (E) و آبکش (F) در گیاه گل سازوی در شرایط تنش خشکی (ظرفیت مزرعه‌ای ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد) داده‌ها، میانگین سه تکرار \pm خطای آزمایشی هستند. حروف کوچک نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری در سطح $P \leq 0.05$ هستند.

Figure 5- The effect of salicylic acid and silicon foliar application on the anatomical parameters of upper (A), lower (B) epidermal cells, fence (C), spongy (D) mesophyll cells, and wood vascular structures (E) and phloem (F) in flowering plants under drought stress conditions (FC50% and FC100%) Data, are mean of three replicates \pm SE. Lowercase letters indicate significant differences at the $P \leq 0.05$ level

جدول ۲- تجزیه واریانس: طول روزنه (LS)، عرض روزنه (WS)، عرض سلول‌های نگهبان روزنه (WG)، تراکم روزنه در واحد سطح (DS)، ضخامت سلول اپیدرم بالایی (Uep)، ضخامت سلول اپیدرم پایینی (Lep)، ضخامت سلول پارانشیم نرده‌ای (Pal)، ضخامت سلول پارانشیم اسفنجی (Spon)، قطر آوند چوبی (Xy)، قطر آوند آبکش (Ph)

Table 2- variance ANOVA: stoma length (LS), stoma width (WS), stoma guard cell width (WG), stoma density per unit area (DS), upper epidermis cell thickness (Uep), lower epidermis cell thickness (Lep), thickness of palisade parenchyma (Pal), thickness of spongy parenchyma (Spon), diameter of xylem (Xy), diameter of phloem (Ph)

میانگین مجموع مربعات

دامنه تغییرات	درجه آزادی	LS (µm)	WS (µm)	WG (µm)	DS (mm ²)	Uep (µm)	Lep (µm)	Pal (µm)	Spon (µm)	Xy (µm)	Ph (µm)	Ss (µm ²)
اکوتیپ	۱	۱۱/۰۲**	۰/۰۴۶ ^{ns}	۱۵/۹۶**	۵/۳۳ ^{ns}	۱۰/۸۳**	۴۲۶/۷**	۵۱۰/۱۹*	۴۷۳/۲**	۰/۰۱۳ ^{ns}	۴۷/۶**	۲۶۴/۲۵ ^{ns}
تنش	۱	۶/۷۵*	۱۸/۱۱**	۹/۹۱۹**	۱۲**	۲۰/۳۸**	۵۰/۹*	۵۳۷**	۱۱۸/۷*	۸۳/۷**	۱۲/۴**	۱۳۷۴۸/۸۵**
اسید سالیسیلیک	۱	۳۲/۵**	۸۷/۳۴**	۲۲/۵۷**	۲۱/۳۳**	۲۰/۵۲**	۱۰۲/۸**	۳۸/۳*	۰/۰۰۶ ^{ns}	۰/۶۶ ^{ns}	۸/۵**	۱۰۲۰۱۶/۰۷**
سیلیکون	۱	۴۳/۱۳**	۵/۸۴۵**	۰/۰۹۹ ^{ns}	۰/۷۵ ^{ns}	۱۰/۳۲ ^{ns}	۲۱/۲ ^{ns}	۶۰/۱۴**	۷۰۵/۹**	۲۰/۴**	۰/۱ ^{ns}	۹۴۱/۹۰۷*
تنش * اکوتیپ	۱	۴۴/۰۸**	۰/۰۱۱ ^{ns}	۴/۵۷**	۰/۷۵ ^{ns}	۳۱۶/۴**	۲۷/۰۹ ^{ns}	۲۴۱۶/۶**	۱۶۶۸/۲**	۱۹/۹**	۲۶/۵**	۵۵۲۷/۸۸**
اسید سالیسیلیک * اکوتیپ	۱	۲۰/۶**	۲۴/۷۸**	۰/۰۷۶ ^{ns}	۰/۰۸۳ ^{ns}	۸۹/۵۷**	۰/۲۵۴ ^{ns}	۲۴۳/۳۱**	۲۶۰/۳**	۳۲/۳۹**	۱۸/۷**	۴۹۸۹/۷۳**
سیلیکون * اکوتیپ	۱	۰/۰۵ ^{ns}	۹/۱۹**	۱۴/۹۸**	۵/۳۳۳**	۲۳۵/۸**	۱۹/۲ ^{ns}	۱۰۵/۸**	۴۵۱/۴**	۱۴/۱**	۲۷/۶**	۵۴۴۷/۹**
اسید سالیسیلیک * تنش	۱	۱۰۶/۵**	۱۰/۰۹*	۷/۱۹۲**	۰/۰۸۳۳ ^{ns}	۳۱/۲۶*	۲۱۶/۸**	۱۲۹۴/۲**	۱۷۶۳/۷**	۱۲/۶۳**	۸/۷**	۵۶۵۷۲/۴**
سیلیکون * تنش	۱	۳۵/۸۸**	۱۲/۵۱**	۰/۰۰۲۳۱ ^{ns}	۱/۳۳ ^{ns}	۴/۸ ^{ns}	۴۱/۱*	۴۶/۶**	۲۳۷/۱**	۴۴/۵**	۸/۷**	۳۳۸۷۲/۷۶**
سیلیکون * اسید سالیسیلیک	۱	۶/۷۵*	۲/۱۸*	۷/۱۹۲**	۸/۳۳۳**	۶۵۰**	۴۴۸/۱**	۷/۴۱ ^{ns}	۲۹/۴ ^{ns}	۵/۹۱**	۴۵/۴**	۱۷/۹۹ ^{ns}
اسید سالیسیلیک * تنش * سیلیکون	۱	۱۳/۵۴**	۶۵/۹۱**	۰/۰۴۲ ^{ns}	۰/۳۳۳ ^{ns}	۴/۲۷*	۵۷/۸**	۳۲۱/۶**	۳۳۸/۱**	۱۶/۷**	۱۸/۴**	۲۳۹۴۷/۱۴**
سیلیکون * تنش * اکوتیپ	۱	۰/۴۲ ^{ns}	۵۵/۷۹**	۵/۱۲۲**	۰/۰۸۳ ^{ns}	۴۹/۷۵**	۴/۸۲ ^{ns}	۱۵۰/۵**	۲۴۵**	۲۵/۲**	۳۶/۲**	۳۹۸۱۱/۱**
سیلیکون * تنش * اکوتیپ	۱	۰/۷۵ ^{ns}	۱۱۵/۵**	۱/۶۵ ^{ns}	۶/۷۵**	۳۶/۵۷*	۱۹/۸ ^{ns}	۵۸/۸**	۷۱*	۰/۱۱۷ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۹۱۵۱۴/۴۱**
سیلیکون * اسید سالیسیلیک * تنش	۱	۳۳/۳۳**	۱/۱۷ ^{ns}	۳/۷۵۲**	۳۶/۷۵**	۵۴/۳۳**	۱۴۴**	۸۸۲/۷**	۱۸۷۷**	۶/۸۷**	۲۳/۱**	۱۲۴۵۲/۷**
سیلیکون * اسید سالیسیلیک * تنش * اکوتیپ	۱	۰/۰۲**	۱/۹۷*	۲/۱۱*	۱/۳۳۳ ^{ns}	۱۱۴/۵۷**	۳۴۶**	۲۶۶/۵**	۳۶۷/۸**	۴۲/۸**	۰/۹۹۴*	۱۹۵۲/۴۷۲ ^{ns}
خطا آزمایشی	۳۲	۱/۱۹۷	۰/۳۰۳۳	۰/۳۴۸	۰/۵۴۲	۶/۰۸	۷/۶۷	۵/۴۱	۱۳/۲	۰/۴۸۷	۰/۲۱۴	۵۸۹/۲۷
دقت آزمایش	-	۴/۲۲	۳/۸۸	۷/۳۸	۱۲/۳۵	۸/۳۹	۱۱/۷۷	۹/۶۷	۱۵/۶	۵/۹۲	۳/۴۸	۶/۵۹

ns, * and ** show no significant and significant differences at 0.05, 0.01 probability level, respectively

بحث و نتیجه گیری

آب و خاک دارد. نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر نشان دادند تنش خشکی باعث کاهش محتوی نسبی آب برگ می‌شود. یکی از مهم‌ترین تغییرات ناشی از تنش خشکی کاهش محتوی نسبی

خشکسالی یک تنش محیطی کلیدی در رشد محصولات است که پیامدهای نامطلوب بر رشد گیاه و مسیرهای متابولیکی مانند فتوسنتز و روابط

خشکی با افزایش فعالیت آنزیم روپیسکو کربوکسیلاز بهبود می‌بخشد. Tahjib-Ul-Arif و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند راندمان مصرف آب برای گیاهان در شرایط خشکسالی به‌عنوان یک شاخص مهم محسوب می‌شود و عامل تعیین‌کننده بهره‌وری در گیاهان است. سیلیکون با رسوب روی دیواره سلولی گیاهان تحت تنش خشکی باعث کاهش تبخیر و تعرق از سطح گیاه می‌شود که نتایج ارائه‌شده در این مطالعه را تأیید می‌کند (Thorne *et al.*, 2020). گیاهان در شرایط تنش خشکی به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب تحت تأثیر تغییرات ریخت‌شناسی (شامل کاهش تراکم روزنه، سلول‌های اپیدرمی، مزوفیلی و آوندی) به‌ویژه در برگ‌ها قرار می‌گیرند که اندام اصلی درونی هستند (Bosabalidis *et al.*, 2002). در مطالعه حاضر کمترین طول روزنه در اکوتیپ آبدانان تیمار ظرفیت زراعی ۵۰ درصد * سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) و کمترین عرض روزنه و عرض سلول‌های نگهبان در اکوتیپ ایلام تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. (Yadollahi, *et al.*, 2011) گزارش کردند عرض روزنه در شرایط تنش خشکی کاهش یافته است که با نتایج حاصل از این پژوهش همخوانی دارد. در مطالعه حاضر اندازه روزنه به‌طور معنی‌داری بین دو اکوتیپ متفاوت بود. کمترین اندازه روزنه در اکوتیپ ایلام تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی * سیلیکون مشاهده شد. این نتایج با یافته‌های Akman و همکاران (۲۰۲۰) مطابق هستند که گزارش کردند تنش خشکی اندازه روزنه را کاهش می‌دهد. این تغییرات نشان‌دهنده سازگاری مورفولوژیکی گیاه در برابر تنش خشکی

آب برگ است. این شاخص می‌تواند توانایی گیاه در تحمل به تنش خشکی را نشان دهد (Heshmat *et al.*, 2021). کاربرد اسید سالیسیلیک باعث افزایش محتوی رطوبت آب برگ در اکوتیپ آبدانان تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی شد. کاربرد اسید سالیسیلیک باعث افزایش محتوی رطوبت نسبی در برگ گیاهان تحت تنش خشکی می‌تواند به‌علت افزایش اسمولیت‌ها در گیاهان باشد (Kabiri *et al.*, 2014). در تأیید نتایج حاصل از این مطالعه، محلول‌پاشی با اسید سالیسیلیک باعث افزایش محتوی نسبی آب برگ در گیاه نعنای در شرایط تنش خشکی شد (Azad *et al.*, 2021). نتایج نشان دادند تیمار خشکی باعث کاهش فتوسنتز، پارامترهای تبادل گازی همچون غلظت دی‌اکسیدکربن زیرروزنه‌ای، تعرق، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب شد؛ اما کاربرد اسید سالیسیلیک و سیلیکون باعث افزایش فتوسنتز، دی‌اکسیدکربن زیرروزنه‌ای، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب در اکوتیپ ایلام تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی شد و کاربرد سیلیکون باعث کاهش تعرق در اکوتیپ ایلام تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی شد. نتایج نشان دادند کاهش جذب آب و سریع بسته‌شدن روزنه‌ها پاسخ اولیه گیاهان به تنش خشکی است که متعاقب آن، فتوسنتز، تعرق، غلظت دی‌اکسیدکربن زیرروزنه‌ای، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب را کاهش می‌دهد که با نتایج ارائه‌شده در این پژوهش همخوانی دارد (Saheri *et al.*, 2020). گزارش شده است که کاربرد اسید سالیسیلیک به‌طور مؤثری استفاده از دی‌اکسیدکربن را برای بهبود رشد در شرایط تنش

همکاران (۲۰۱۹) گزارش شده است ضخامت سلول‌های مزوفیلی (نرده‌ای و اسفنجی) در گیاه آویشن تحت تنش خشکی کاهش یافت که با نتایج ارائه‌شده در این پژوهش همخوانی دارد. در این مطالعه قطر سلول‌های آوند چوبی در اکوتیپ ایلام تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی کاهش یافت. کاهش در قطر سلول‌های آوند چوبی در گیاهان تحت تنش خشکی احتمالاً بر اثر فعال‌شدن مسیر بیوسنتز متابولیت فنیل‌آلانین - تیروزین است که سنتز پلیمر لیگنین و رسوب آن در دیواره‌ها و در نتیجه کاهش اندازه سلول را سبب می‌شود (Liu *et al.*, 2018). گزارش شده است رشد سلول در گیاهان در شرایط تنش خشکی توسط ژن‌های لاکاز، پراکسیدازها و S-متیونین سنتتاز کنترل می‌شود که در مسیر بیوسنتز لیگنین هستند (Jafarian *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2018). در گیاهان در شرایط تنش خشکی، کاهش آب باعث ایجاد آمبولی در آوند چوبی می‌شود و در حفظ پیوستگی آب اختلال ایجاد می‌کند (Abd Elbar *et al.*, 2019). در تأیید نتایج یافته‌های ما در این مطالعه، Abdelaal و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند در گیاهان باقلا تحت تنش خشکی قطر آوند چوبی کاهش یافت. قطر آوند آبکش در اکوتیپ آبدانان تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی کاهش یافت. مطالعات نشان می‌دهند خشکسالی بر تقسیمات پروکامبیوم آوندی در مراحل اولیه رشد تأثیر می‌گذارد و در نهایت به کاهش قطر آوندها منجر می‌شود (Ab Elbar *et al.*, 2019). آوند آبکش، محصولات فتوسنتزی در همه جهات و در واحد زمان انتقال و همبستگی مثبت با قطر آوند

است (Maherali *et al.*, 2002). تراکم روزنه با توجه به عوامل ژنتیکی و محیطی متفاوت است. مطالعه حاضر نشان داد بیشترین تراکم روزنه در اکوتیپ آبدانان تیمار شاهد و کمترین در اکوتیپ آبدانان تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. تراکم روزنه‌ای همبستگی قوی با تعرق در گیاه دارد؛ به این صورت که گیاهان با تراکم روزنه‌ای بالا، بیشتر آب را به شکل تعرق از دسترس گیاه خارج می‌کنند که با یافته‌های ما در این مطالعه همخوانی دارد (Buckley *et al.*, 2005). در مطالعه حاضر ضخامت اپیدرم فوقانی در اکوتیپ ایلام تیمار شاهد * سیلیکون به‌طور معنی‌دار نسبت به تیمار تنش افزایش نشان داده است. همچنین مساحت سلول‌های اپیدرم تحتانی در اکوتیپ آبدانان تیمار تنش نسبت به شاهد کاهش یافته است. کاهش در ضخامت اپیدرم فوقانی یک سازگاری مورفولوژیکی در گیاهان است تا از اثرات مخرب تنش خشکی بر شاخص‌های ریخت‌شناسی جلوگیری کند. کاهش ضخامت اپیدرم در گیاه لوبیا چشم بلبلی در شرایط تنش شوری مشاهده شد که با نتایج ما در این مطالعه همخوانی دارد (El-Taher *et al.*, 2022). در پژوهش حاضر مساحت سلول‌های مزوفیل نرده‌ای و اسفنجی در اکوتیپ ایلام تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی * سیلیکون کاهش یافت. یکی از دلایل کاهش مساحت سلول‌های مزوفیلی در گیاهان در شرایط تنش خشکی رسوب سیلیکون در فضای بین سلولی است که عرصه را بر این سلول‌ها تنگ کرده است و موجب کاهش مساحت در این سلول‌ها می‌شود (Agami *et al.*, 2013). در مطالعه Abd Elbar و

۹۵ درصد معنی‌دار نبود. اثر بهبود اسید سالیسیلیک بر رشد گیاه در شرایط تنش خشکی با نقش در جذب مواد مغذی و پایداری غشای سلولی مرتبط است (Dianat et al., 2016).

در مطالعه حاضر، تنش خشکی کاهش فتوسنتز، پارامترهای تبادل گازی، تغییرات ریخت‌شناسی و افزایش نشت یونی را در گیاه گل سازویی موجب شد. کاربرد سیلیکون موجب افزایش محتوی رطوبت نسبی شد. کاربرد همزمان اسید سالیسیلیک (۱۰۰ ppm) و سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) صدمات ناشی از تنش خشکی را کاهش داد و افزایش فتوسنتز و پارامترهای تبادل گازی را موجب شد. همچنین اسید سالیسیلیک و سیلیکون احتمالاً با تأثیر مثبت بر ساختار گیاه، شاخص‌های ریخت‌شناسی گل سازویی را در شرایط تنش خشکی بهبود می‌بخشد.

Reference

- Abd Elbar, O. H., Farag, R. E. and Shehata, S. A. (2019). Effect of putrescine application on some growth, biochemical and anatomical characteristics of *Thymus vulgaris* L. under drought stress. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(2), 129-137.
- Abdelaal, Kh. A. A. (2015) Effect of salicylic acid and abscisic acid on morpho-physiological and anatomical characters of faba bean plants (*Vicia faba* L.) under drought stress. *Journal of Plant Production* 6(11): 1771-1788.
- Agami, R. A. (2013). Salicylic acid mitigates the adverse effect of water stress on lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Applied Sciences Research*, 9(11), 5701-5711.
- آبکش دارد. با تغییر در قطر، سرعت حرکت مواد کاهش می‌یابد و در نهایت به رشد در گیاه منجر می‌شود (Canny et al., 1960). در مطالعه حاضر تنش خشکی به کاهش محتوی پروتئین کل منجر شد. تنش خشکی با تأثیر بر متابولیسم نیتروژن، سنتز پروتئین در گیاهان تحت تنش خشکی را کاهش می‌دهد (Kabiri et al., 2014). از دلایل دیگر کاهش پروتئین در مطالعه حاضر، افزایش گونه‌های فعال اکسیژن است؛ این گونه‌ها بسیار سیتوتوکسیک هستند و باعث کاهش پروتئین در گیاهان تحت تنش خشکی می‌شوند (Kabiri et al., 2014).
- محتوی پروتئین کل در گیاه سیاه‌دانه و به‌لیمو در شرایط تنش خشکی کاهش یافت که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد (Kabiri et al., 2014; Dianat et al., 2016). کاربرد اسید سالیسیلیک و سیلیکون باعث افزایش محتوی پروتئین در اکوتیپ ایلام تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی شد؛ اما اختلاف بین آنها معنی‌دار نبود. کاربرد اسید سالیسیلیک، افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز و محتوی نیترات و در نتیجه افزایش محتوی کل پروتئین در گیاهان تحت تنش خشکی را سبب شد که با یافته‌های ما در این مطالعه همخوانی دارد (Fariduddin et al., 2003). در این پژوهش، تنش خشکی باعث افزایش نشت یونی در اکوتیپ آبدانان تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی شد. نشت یونی اغلب به‌عنوان یک مورد آسیب رادیکال‌های آزاد به غشای سلول در شرایط تنش خشکی اندازه‌گیری می‌شود (Halliwell and Gutteridge, 1984). کاهش نشت یونی با کاربرد اسید سالیسیلیک و سیلیکون در اکوتیپ آبدانان با احتمال

- Akman, H., Zhang, C. and Ejeta, G. (2020) Physio-morphological, biochemical, and anatomical traits of drought-tolerant and susceptible sorghum cultivars under pre- and post-anthesis drought. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 912-921.
- Azad, N., Rezayian, M., Hassanpour, H., Niknam, V. and Ebrahimzadeh, H. (2021). Physiological mechanism of salicylic acid in *Mentha pulegium* L. under salinity and drought stress. *Brazilian Journal of Botany*, 44, 359-369.
- Bazi Zlan, R. Fazeli, A., Zarei, B. and Erfani Moghadam, J. (2022). Effect of salicylic acid on enzyme activity and secondary metabolites (*Scrophularia striata*) under water deficit stress. *Iranian Journal of Plant Biology*, 13(4), 55-66 (in Persian).
- Bertolineo, L., Caine, R.S. and Gray, J. E. (2019) Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world. *Frontiers in Plant Science*, 10, 225.
- Bhardwaj, S. and Kapoor, D. (2021). Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 1044-1053.
- Bosabalidis, A. M. and Kofidis, G. (2002). Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars. *Plant Science*, 163(2), 375-379.
- Buckley, T. N. (2005). The control of stomata by water balance. *New Phytologist*, 168(2), 275-292.
- Canny, M. J. (1960). The rate of translocation. *Biological Reviews*, 35(4), 507-32.
- Dahiya, I. S., Hajrasuliha, S. and Lamba, P. S. (1979). A quick method of soil moisture determination. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 10(5), 795-805.
- Dianat, M., Saharkhiz, M. J. and Tavassolian, I. (2016). Salicylic acid mitigates drought stress in *Lippia citriodora* L.: Effects on biochemical traits and essential oil yield. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 8, 286-293.
- Diaz-Perez, J. C., Shackel, K. A. and Sutter, E. G. (2006). Relative water content. *Annals of Botany*, 97(1), 85-96.
- El-TaHER, A. M., El-Raouf, A., Hany, S., Osman, N. A., Azoz, S. N., Omar, M. A., ... and Mahmoud, A. M. (2022). Effect of salt stress and foliar application of salicylic acid on morphological, biochemical, anatomical, and productivity characteristics of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) plants. *Plants*, 11(1), 115.
- Fariduddin, Q., Hayat, S. and Ahmad, A. (2003). Salicylic acid influences net photosynthetic rate, carboxylation efficiency, nitrate reductase activity, and seed yield in *Brassica juncea*. *Photosynthetica*, 41, 281-284.
- Fischer, R. A., Rees, D., Sayre, K. D., Lu, Z. M., Condon, A. G. and Saavedra, A. L. (1998). Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Journal of Crop Science*, 38(6), 1467-1475.
- Halliwell, B. and Gutteridge, J. (1984). Oxygen toxicity, oxygen radicals, transition metals and disease. *Biochemical Journal*, 219(1), 1-14.
- Heshmat, K., Asgari Lajayer, B., Shakiba, M. R. and Astatkie, T. (2021). Assessment of physiological traits of common bean cultivars in response to water stress and molybdenum levels. *Journal of Plant Nutrition*, 44(3), 366-372.
- Jafarian, T., Maghsoudi, M. and Safari, V. R. (2013). Effects of drought stress on anatomical and physiological characteristics of leaves of two wheat

- cultivars. *Journal of Agricultural and Horticultural Technology Products*, 4, 13 (in Persian).
- Kabiri, R., Nasibi, F. and Farahbakhsh, H. (2014). Effect of exogenous salicylic acid on some physiological parameters and alleviation of drought stress in *Nigella sativa* plant under hydroponic culture. *Journal of Plant Protection Science*, 50(1), 43-51.
- Kafi, M. and Rahimi, Z. (2011). Effect of salinity and silicon on root characteristics, growth, water status, proline content and ion accumulation of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 57(2), 341-347.
- Kerdar, T., Rabienejad, N., Alikhani, Y., Moradkhani, S. and Dastan, D. (2019). Clinical, in vitro and phytochemical, studies of *Scrophularia striata* mouthwash on chronic periodontitis disease. *Journal of Ethnopharmacology*, 239, 111872.
- Kordrostami, M. and Mafakheri, M. (2020) Rapeseed: Biology and physiological responses to drought stress. *Plant Family Brassicaceae*, 528, 263-276.
- Lertngim, N., Ruangsiri, M., Klinsawang, S., Raksatikan, P., Thunnom, B., Siangliw, M., Toojinda, T. and Siangliw, J.L. (2022) Photosynthetic plasticity and stomata adjustment in chromosome segment substitution lines of rice cultivar kdml105 under drought stress. *Plants*, 12(1), 94.
- Liu, Q., Luo, L. and Zheng, L. (2018). Lignins: biosynthesis and biological functions in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(2), 335.
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr A. L. and Randall, R. J. (1951). Protein measurement with the folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265-275.
- Maherali, H. C. D. R., Reid, C. D., Polley, H. W., Johnson, H. B., and Jackson, R. B. (2002). Stomatal acclimation over a subambient to elevated CO₂ gradient in a C3/C4 grassland. *Journal of Plant, Cell and Environment*, 25(4), 557-566.
- Rostami, Z. and Fazeli, A. (2021) Identification and isolation of cinnamate 4-hydroxylase and chalcone synthase genes in the roots of *Scrophularia striata* and study of their expression and some physiological traits under the influence of various abiotic elicitors. *Agricultural Biotechnology Journal*, 13(1), 1-28 (in Persian).
- Rostami, Z., Fazeli, A. and Hojati, Z. (2022). The isolation and expression analysis of cinnamate 4-hydroxylase and chalcone synthase genes of *Scrophularia striata* under different abiotic elicitors. *Scientific Reports*, 12(1), 8128.
- Saheri, F., Barzin, G., Pishkar, L., Boojar, M. M. A. and Babaeekhou, L. (2020). Foliar spray of salicylic acid induces physiological and biochemical changes in purslane (*Portulaca oleracea* L.) under drought stress. *Biologia*, 75(12), 2189-2200.
- Schonfeld, M. A., Johnson, R. C., Carver, B. F. and Mornhinweg, D. W. (1988). Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. *Journal of Crop Science*, 28(3), 526-531.
- Seal, P., Das, P. and Biswas, A. K. (2018). Versatile potentiality of silicon in mitigation of biotic and abiotic stresses in plants: a review. *American Journal of Plant Sciences*, 9(7), 1433-1454.
- Shohani, F., Fazeli, A. and Hosseinian Sarghein, S. (2023) The effect of silicon application and salicylic acid on enzymatic and non-enzymatic reactions of *Scophularia striata* L. under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 319, 112143.
- Tahjib-Ul-Arif, M., Siddiqui, M. N., Sohag, A. A. M., Sakil, M. A., Rahman, M. M., Polash, M. A. S., ... and Tran, L. S. P. (2018). Salicylic acid-mediated

enhancement of photosynthesis attributes and antioxidant capacity contributes to yield improvement of maize plants under salt stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37, 1318-1330.

Thorne, S. J., Hartley, S. E. and Maathuis, F. J. (2020). Is silicon a panacea for alleviating drought and salt stress in crops? *Journal of Frontiers in Plant Science*, 1221.

Xu, Z. and Zhou, G. (2008). Responses of leaf stomatal density to water status and its relationship with photosynthesis in a grass. *Journal of Experimental Botany*, 59(12), 3317-3325.

Yadollahi, A., Arzani, K., Ebadi, A., Wirthensohn, M. and Karimi, S. (2011). The response of different almond genotypes to moderate and severe water stress in order to screen for drought tolerance. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 403-413.

Zargoosh, Z., Ghavam, M., Bacchetta, G., and Tavili, A. (2019). Effects of ecological factors on the antioxidant potential and total phenol content of *Scrophularia striata* Boiss. *Scientific Reports*, 9(1), 16021.

