Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

Print ISSN: 2322-2050
Online ISSN: 2322-2778

Mitigation of root and shoot proline content in response to jasmonic and salicylic acid in *Rosa damacena* subjected to short drought stress

Mina Khorrami Moghadam[1], Mostafa Khoshhal Sarmast[*2], Azim Ghasemnezhad[3], Tatyana Savchenko[4]

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Horticultural Sciences and Landscape, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mkhorrami1375@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Horticultural Sciences and Landscape, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mkhsarmast@gau.ac.ir
3. Professor, Dept. of Horticultural Sciences and Landscape, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: azimghasemnezhad@gmail.com
4. Professor, Institute of Basic Biological Problems, RAS, Pushchino, Russia. E-mail: savchenko-t@rabmler.ru

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 07.11.2023
Revised: 10.07.2023
Accepted: 11.01.2023

Keywords:
JA,
Proline content,
SA,
Water shortage

ABSTRACT

Background and Objectives: Improvement of plant tolerance to adverse environmental conditions has been proven by phytohormones in various plants species. However, the crosstalks between salicylic acid and jasmonic acid hormones under drought stress conditions have not been studied. Therefore, in this study, changes in the growth rate of aerial and underground organs as well as the proline content of aerial parts and roots of *R. damacena* to jasmonic acid and salicylic acid during the cource of drought stress conditions at three different times point were investigated.

Materials and Methods: Clonally propagated plants sown into plastic pots were exposed to constant water shortage at 25, 50 and 100% of field capacity for 11 days. Plants under different drought stress treatment foliar spraied with jasmonic acid (50 µM) and a combination of jasmonic (50 µM) and salicylic acid (1.5 µM). The first foliar application was performed a few days before the first day of the experiment and twice after the start of the water stress at intervals of seven days. Sampling was performed on days 1, 4 and 11 and morphophysiological responses (stem height, root fresh weight, root dry weight, Ionic leakage) and biochemical (leaf proline and root proline) were measured. The experiment was performed in factorial format and in a completely randomized block.

Results: Regardless of hormonal treatment, the measured traits such as stem height, root fresh weight, root dry weight decreased compared to the control and other traits such as leaf and root proline, ion leakage increased compared to the control in drought stressed plants. Plants grown under 25% of FC showed a 4-fold increase in proline content when exposed to JA in contrast to that of control sprayed with distilled water after 4 days. This increase in proline content in shoots and roots was similar. However, non-drought stressed plants which were exposed to JA, did not show such changes. The results show that the combination of SA and JA reduces the amount of ion leakage of leaves and the proline content of roots and shoots by half to the amount produced in plants sprayed with distilled water at 25% of FC and this amount of proline is very close to non-drought stressed plants. The results showed that the loss of fresh and dry weight of roots, which was evident in JA–received plant under 25% of FC can

potentially be reversed by combination of SA and JA. This was also truth for stem height.

Conclusion: The drought stress mitigation of SA by reversing JA effects manifested in mitigating cell ion leakage, and increase in root fresh and dry weight. Reducing the root and shoot proline content and leaf ion leakage in plant exposed to combination of JA and SA compared to JA alone indicated a negative regulatory effect of SA on JA on modulating leaf and shoot proline content as a physiological indicator of drought tolerance.

Cite this article: Khorrami Moghadam, Mina, Khoshhal Sarmast, Mostafa, Ghasemnezhad, Azim, Savchenko, Tatyana. 2024. Mitigation of root and shoot proline content in response to jasmonic and salicylic acid in *Rosa damacena* subjected to short drought stress. *Journal of Plant Production Research*, 30 (4), 171-190.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JOPP.2024.21547.3063
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۵۰
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۷۸

تعدیل میزان پرولین برگ و ریشه گل‌محمدی در پاسخ به اسید سالسیلیک و اسید جاسمونیک تحت تنش خشکی

مینا خرمی مقدم[۱]، مصطفی خوشحال سرمست*[۲]، عظیم قاسم‌نژاد[۳]، تاتیانا ساویچنگو[٤]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mkhorrami1375@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mkhsarmast@gau.ac.ir

۳. استاد گروه علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: azimghasemnezhad@gmail.com

٤. استاد مؤسسه مسائل اساسی بیولوژیک، راس، پوشچینو، روسیه. رایانامه: savchenko-t@rabmler.ru

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۲/۰٤/۲۰
تاریخ ویرایش: ۱٤۰۲/۰۷/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۲/۰۸/۱۰

واژه‌های کلیدی:
اسید جاسمونیک،
اسید سالیسلیک،
تنش کم آبیاری،
محتوای پرولین

چکیده

سابقه و هدف: بهبود تحمل به شرایط نامساعد محیطی توسط تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی در گیاهان گوناگون به اثبات رسیده است. با این وجود اثرات متقابل میان تنظیم‌کننده رشد اسید سالیسلیک و اسید جاسمونیک در شرایط تنش خشکی کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش تغییر میزان رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی، هم‌چنین میزان پرولین اندام‌های هوایی و ریشه گیاهان دو ساله گل‌محمدی به اسید جاسمونیک و اسید سالسیلیک خارجی در شرایط متفاوت تنش خشکی در سه زمان متفاوت از شروع تنش مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: گیاهان هم‌گروهی مستقر شده در گلدان‌های پلاستیکی به مدت ۱۱ روز در شرایط ثابت رطوبت ۱۰۰، ۵۰ و ۲۵ ± ۵ درصد ظرفیت مزرعه قرار گرفتند. محلول‌پاشی برگی با تنظیم‌کننده رشد اسید جاسمونیک (۵۰ میکرومولار) و ترکیب اسیدجاسمونیک (۵۰ میکرومولار) و اسید سالیسیلیک (۱/۵ میلی‌مولار) انجام شد. اولین محلول‌پاشی ۵ روز پیش از اولین روز آزمایش و دو مرتبه پس از شروع آزمایش به فاصله هفت روز انجام شد. نمونه‌برداری در روز ۱، ٤ و ۱۱ انجام و پاسخ‌های ریخت‌شناسی- فیزیولوژیک (ارتفاع ساقه، وزن تر ریشه، وزن خشک ریشه و نشت یونی) و زیست شیمیایی (پرولین برگ و پرولین ریشه) اندازه‌گیری شدند. آزمایش در قالب فاکتوریل و به صورت بلوک کامل تصادفی انجام شد.

یافته‌ها: بدون توجه به تیمار تنظیم‌کننده رشد، صفات اندازه‌گیری شده مانند ارتفاع ساقه، وزن تر و خشک ریشه در مقایسه با شاهد کاهش یافت و صفات دیگر مانند پرولین برگ و ریشه، نشت یونی، نسبت به شاهد در شرایط تنش خشکی ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت مزرعه افزایش یافت. میزان افزایش به ٤ برابر در گیاهان محلول‌پاشی شده با اسید جاسمونیک در مقایسه با شاهد محلول‌پاشی شده با آب مقطر پس از ٤ روز در تنش ۲۵ درصد رسیده است. این افزایش میزان پرولین در شاخساره و ریشه مشابه بوده است. به هر حال در گیاهانی که در شرایط رطوبت نرمال ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه بودند در اثر محلول‌پاشی اسید جاسمونیک این سطح از این تغییرات را نشان ندادند. نتایج بیانگر این است که ترکیب اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک میزان نشت یونی برگ و میزان پرولین ریشه و شاخساره را به نصف میزان تولید شده در گیاهان محلول‌پاشی شده با آب مقطر در تنش ۲۵ درصد کاهش می‌دهد و این میزان پرولین بسیار نزدیک به میزانی است که در گیاهان قرار گرفته در رطوبت ۱۰۰ درصد قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که کاهش وزن تر و خشک ریشه که در تنش ۲۵ درصد به‌صورت تنها یا به همراه تیمار اسید جاسمونیک مشهود بود به وسیله کاربرد اسید سالسیلیک قابل برگشت می‌باشد و این موضوع در بهبود ارتفاع ساقه گل‌محمدی نیز نمایان بود.

نتیجه‌گیری: اثر تعدیل‌کنندگی تنش خشکی به وسیله خنثی نمودن اثر اسید جاسمونیک توسط اسید سالیسیلیک در میزان نشت یونی سلول و افزایش وزن تر و خشک ریشه مشاهده شد. کاهش تولید پرولین برگ و ریشه هم‌چنین تعدیل نشت یونی در برگ گل‌محمدی تحت تنش خشکی در گیاهان محلول‌پاشی شده با ترکیب اسید جاسمونیک همراه اسید سالیسیلیک در مقایسه با اسید جاسمونیک تنها، بیانگر اثر تنظیم‌کنندگی منفی اسید سالسیلیک بر روی اسید جاسمونیک در تعدیل میزان پرولین برگ و شاخساره به عنوان یک شاخص فیزیولوژیک تحمل به خشکی می‌باشد.

استناد: خرمی مقدم، مینا، خوشحال سرمست، مصطفی، قاسم‌نژاد، عظیم، ساویچنگو، تاتیانا (۱۴۰۲). تعدیل میزان پرولین برگ و ریشه گل‌محمدی در پاسخ به اسید سالسیلیک و اسید جاسمونیک تحت تنش خشکی. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۰ (۴)، ۱۹۰-۱۷۱.

DOI: 10.22069/JOPP.2024.21547.3063

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

تیره *Rosaceae* بیش از ۳۵۰۰۰ رقم تجاری دارد که بیش‌تر آن‌ها دورگه هستند. جنس رز از ۳٦۵ گونه و ۸٤ دورگه تشکیل شده است (۱). رزها بومی نیمکره شمالی (۲۰-۷۰ درجه شمالی) هستند و می‌توانند در شرایط مختلف آب و هوایی رشد کنند (۲). یکی از مهم‌ترین گونه‌های تیره *Rosaceae* گل‌محمدی است که به احتمال یک گونه دورگه است (۳). گل‌محمدی درختچه‌ای کوچک و خاردار به ارتفاع ۱ تا ۲ متر با شاخه‌های زیاد و تیغ‌های ریز فراوان است (٤). خاستگاه جغرافیایی و تاریخی گل‌محمدی ایران بوده و در قرن چهاردهم میلادی، این گل به اروپا و شمال آفریقا رفته است (۵). در حال حاضر گل‌محمدی یکی از مهم‌ترین گونه‌های دارویی، معطر و زینتی است که در بسیاری از مناطق جهان مانند بلغارستان، هندوستان، ترکیه و ایران کشت و کار می‌گردد (٦). در ایران، استان‌های اصفهان و فارس و به‌ویژه شهرستان کاشان از مهم‌ترین قطب‌های تولید گل، گلاب و اسانس کشور به‌شمار می‌روند (۷).

گیاهان در طول چرخه زندگی خود در معرض تنش‌های زیستی و غیرزیستی مانند شوری، تنش اکسیداتیو، خشکسالی، نور زیاد، فلزات سنگین و اشعه ماوراءبنفش قرار دارند (۸، ۹). تنش خشکی بر رشد و بهره‌وری گیاهان از جمله تمام محصولات عمده در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد (۱۰). خشکسالی سالانه کاهش میلیاردها دلار عملکرد محصول را در بردارد (۱۱). تنش خشکی علاوه بر کاهش رشد و عملکرد، فرایندهای فیزیولوژیک گیاه را مختل می‌کند، تولید گونه‌های فعال اکسیژن را افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاهان و اثرهای منفی بر روی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، فتوسنتز و ماکرومولکول‌های زیستی می‌شود (۱۲). تنش خشکی از طریق کاهش شاخص سطح برگ، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش پتانسیل آب پروتوپلاسم، کاهش سنتز پروتئین و کلروفیل، سبب کاهش فتوسنتز می‌گردد (۱۳). این در حالی است که در شرایط تنش خشکی گیاهان از طریق سازوکارهای مختلف مانند بستن روزنه‌ها (۱۳)، ضخیم شدن لایه کوتیکول، بالا نگه داشتن میزان فتوسنتز، افزایش وزن و طول ریشه (۱٤). در برابر خشکی و اثرات سوء آن مقاومت می‌کند. گیاهان پاسخ‌های ریخت شناسی، فیزیولوژیکی، زیست شیمیایی و مولکولی متفاوتی در شرایط تنش نشان می‌دهند (۱۵، ۱٦، ۱۷). یکی از مهم‌ترین این سازوکار تجمع اسمولیت‌های سازگار مانند پرولین است (۱۸، ۱۹). این سازوکارها با مجموعه‌ای از فعالیت‌های زیستی و مولکولی در سطح سلولی هماهنگ می‌شوند (۲۰، ۲۱). این اسید آمینه (۲۲، ۲۳) تحت تنش‌های زیستی و غیرزیستی مانند شوری (۲٤)، تنش اکسیداتیو (۲۵)، خشکسالی (۲۳)، نور زیاد (۲۲)، فلزات سنگین (۲٦) و تابش اشعه ماوراءبنفش (۲۷) تجمع می‌یابد. هم‌چنین پاسخ گیاه به تنش تا حدی توسط ژن‌های کنترل‌کننده تولید تنظیم‌کننده‌های رشد تنظیم می‌شود. تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی ممکن است نقش مثبت و منفی را در تحمل گیاه به تنش‌های محیطی ایفا کنند (۲۸). در تنش خشکی، غلظت تنظیم‌کننده‌های رشد در سلول‌ها به عوامل زیادی مانند مدت زمان و شدت تنش بستگی دارد (۲۹، ۳۰). نشان داده شده است که تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی ممکن است واکنش گیاه به عوامل تنش را در آخرین مرحله انتقال سیگنال سلولی با فعال یا غیرفعال کردن عوامل رونویسی تنظیم کنند (۳۱).

اسید جاسمونیک و متیل جاسمونات از جمله تنظیم‌کننده‌های رشد درون‌زایی هستند که نقش

کلیدی در رشد و نمو گیاه و پاسخ به تنش‌های محیطی ایفا می‌کنند (۳۲، ۳۳). گزارش شده است که اسید جاسمونیک و متیل‌استرآن (متیل‌جاسمونات)، ژن‌های دخیل در عکس‌العمل گیاهان به تنش‌های زنده و غیرزنده را القا می‌کنند و این تنظیم‌کننده‌های رشد در تنظیم بسته شدن روزنه، پیری و ریزش برگ در گیاهان نقش ایفا می‌کنند اسید سالیسیلیک (۳٤). ترکیبات فنلی است که به وسیله سلول‌های ریشه تولید می‌شود و نقش مهمی در رشد و نمو ایفا می‌کند (۳۵). سازوکار عمل اسید سالیسیلیک در برابر تنش‌ها به نقش آن در تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات دارای گونه‌های اکسیژن فعال در گیاه برمی‌گردد (۳٦). اسید سالیسیلیک در باز و بسته شدن روزنه‌ها نقش دارد به عنوان مثال در گل سوسن (*Lilium* spp.) هنگام گلدهی این تنظیم‌کننده رشد در تولید گرما، جذب یون‌ها از ریشه و ضریب هدایت روزنه‌ها نقش دارد (۳۷). در سال‌های اخیر کاربرد مواد تنظیم‌کننده رشد مانند اسید سالیسیلیک در پاسخ‌های دفاعی گیاهان و مقاومت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی مورد توجه قرار گرفته است (۳۸). با وجود این‌که نقش این تنظیم‌کننده‌های رشد در شرایط تنش تا حدودی آشکار شده است اما اثر آنتاگونیستی اسید سالیسیلیک بر روی اسید جاسمونیک در شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار نگرفته است. برهمکنش تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی بسیار پیچیده است. بررسی پاسخ‌های گیاهان در شرایط تنش خشکی به تنظیم‌کننده‌های رشد فهم ما را از چگونگی سازگاری گیاهان در شرایط کم آبی افزایش خواهد داد. به همین دلیل در این مطالعه تغییرات میزان پرولین در اندام‌های هوایی و زیر زمینی در شرایط تنش خشکی متفاوت در سه زمان در گل محمدی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در قالب طرح فاکتوریل بر پایه بلوک با سه تکرار در شرایط کنترل شده با متوسط دمای ۳۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۳۵ درصد و شدت نور ٤۰۰۰۰–۵۰۰۰۰ لوکس در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. قلمه‌های دوساله ریشه‌دار شده (گل‌محمدی) *Rosa damascene* از گلخانه دهکده رز (واقع در استان خراسان شمالی شهرستان بجنورد روستای خداقلی) تهیه شدند. تیمارهای آبیاری در سه سطح (۱۰۰، ۵۰، ۲۵ درصد با دقت ± ۵ درصد ظرفیت زراعی مزرعه) اعمال شد. در رابطه با نحوه اعمال تنش، گلدان‌ها با استفاده از ترازو به‌صورت هم وزن از خاک مزرعه دانشگاه پر شدند. یک نمونه از خاک مورد استفاده با آب به حالت اشباع درآمد و سپس در داخل چهار لوله آزمایش قرار داده شد و به مدت ۱۰ دقیقه با دور ٤۹۰۰ دور سانتریفیوژ گردید تا آب ثقلی آن جدا گردد. بعد از جدا نمودن آب ثقلی، خاک داخل هر چهار لوله وزن گردید و سپس به مدت ۲٤ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس در آون خشک گردید و دوباره وزن گردید. در نهایت با کسر نمودن وزن خشک خاک از وزن مرطوب خاک، درصد رطوبت در حد ظرفیت زراعی از رابطه ۱ به‌دست آمد.

$$\theta_m = \frac{mw}{ms} \times 100 \qquad (۱)$$

در این رابطه θ_m درصد رطوبت خاک، m_w وزن خاک مرطوب و m_s وزن خشک خاک می‌باشد (۳۹).

پس از انتقال، گیاهان ریشه‌دار در گلدان‌ها قبل از اعمال تنش به خوبی مستقر شدند. سپس با استفاده از وزن نمودن روزانه گلدان‌ها، میزان رطوبت گلدان‌ها به ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد رسانده شد. محلول‌پاشی

برگی گل‌محمدی اوایل صبح با استفاده از تنظیم‌کننده اسید جاسمونیک ۵۰ میکرومولار و ترکیب اسید جاسمونیک ۵۰ میکرومولار و اسید سالیسیلیک ۱/۵ میلی‌مولار بر روی گیاهان تحت تنش خشکی ۱۰۰، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، سه بار و هر بار با فاصله زمانی ۷ روز انجام شد. گیاهان به مدت ۱۱ روز تحت شرایط تنش قرار گرفتند. اولین محلول‌پاشی یک هفته قبل از شروع تنش انجام شد. در گیاهان شاهد محلول پاشی با آب بر روی سطح برگ انجام شد. گلدان‌ها هر روز وزن شدند تا در حد ظرفیت زراعی موردنظر حفظ شوند. نمونه‌برداری در روز اول، چهارم و یازدهم در سطوح تنش خشکی مختلف انجام شد. نمونه‌های برداشت شده از برگ بلافاصله در ازت مایع قرار داده شدند و سپس به فریزر ۸۰- درجه سلسیوس منتقل شدند.

طول شاخساره و ارتفاع بوته: در رابطه با ارتفاع بوته، میانگین طول تمام شاخه‌های اصلی در هر گلدان مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. میانگین چند اندازه‌گیری در یک گلدان مبنای عدد نهایی بود.

وزن تر و خشک ریشه: گیاهان با دقت از گلدان بیرون آورده شدند و پس از جدا کردن ریشه از شاخساره و شستشوی ریشه از گل‌ولای با آب، وزن‌تر آن در پایان آزمایش بر حسب گرم در گلدان اندازه‌گیری شد. وزن خشک همان ریشه‌ها پس از قرار دادن در فویل آلومینیومی و پس از ٤٨ ساعت نگه‌داری در آون ٦٠ درجه سلسیوس بر حسب گرم در گلدان یادداشت شد.

نشت یونی: برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در برگ، ۰/۵ گرم از نمونه‌های برگی به همراه ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر در لوله آزمایش ریخته شد. به‌مدت ٢٤ ساعت روی شیکر گذاشته شد و هدایت الکتریکی محلول (EC_1) با استفاده از دستگاه EC سنج دیجیتالی قرائت شد، سپس نمونه‌ها در دستگاه اتوکلاو با دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد و هدایت الکتریکی محلول (EC_2) بافت‌های از بین رفته از خنک شدن در دمای اتاق از دستگاه EC سنج دیجیتالی محاسبه شد (٤٠). فرمول محاسبه نشت یونی مطابق رابطه ۲ است:

$$\text{lectrolyte leakage} = \frac{EC1}{EC2} * 100 \qquad (۲)$$

پرولین برگ و ریشه: مقدار نیم گرم از برگ گل‌محمدی تحت تیمارهای مختلف به مدت ٤٨ ساعت در ۱۰ میلی‌لیتر محلول آبی سولفوسالیسیلیک اسید ۳ درصد قرار داده شد. محلول حاصل از کاغذ صافی عبور داده شد. ۲ میلی‌لیتر از این محلول را با ۲ میلی‌لیتر معرف ناین‌هیدرین مخلوط کرده و به هر لوله آزمایش ۲ میلی‌لیتر استیک اسید اضافه گردید. پس از این مرحله، نمونه‌ها در حمام بن ماری ۱۰۰ درجه قرار داده شد و پس از خروج از حمام روی یخ به‌مدت ۵ دقیقه قرار گرفتند، سپس به هر لوله مقدار ٤ میلی‌لیتر تولوئن افزوده و به مدت ۲۰ ثانیه هم‌زده شد تا کاملاً یکنواخت شوند. فاز رویی جدا گردید و در دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر برای تعیین مقدار پرولین قرار داده شد. برای محاسبه غلظت پرولین از منحنی استاندارد استفاده شد (٤١).

تیمارها، طرح آماری و تجزیه داده‌ها: این آزمایش گلدانی در گلخانه شیشه‌ای و در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. داده‌ها با نرم‌افزار SAS تجزیه و مقایسه میانگین با آزمون LSD انجام شد.

نتایج

اثر تنظیم‌کنندگی منفی اسید سالسیلیک بر روی اسید جاسمونیک در تعدیل میزان پرولین برگ و شاخساره: نتایج بیانگر این است گل‌های محمدی در شرایط رطوبت زراعی ۱۰۰ درصد به نظر نمی‌رسد که با سه بار محلول‌پاشی برگی تغییر ملموسی در میزان پرولین برگ خود داشته باشند (شکل ۱ الف). این حالت در میزان پرولین ریشه نیز تغییر چندانی در رطوبت ۱۰۰ درصد ندارد. این در حالی است که گیاهان قرار گرفته در بالاترین شدت تنش خشکی، تغییرات زیادی در میزان پرولین برگ و شاخساره از خود نشان دادند. به‌طوری‌که در گیاهانی که در تنش ۲۵ درصد قرار داشتند و با آب مقطر محلول‌پاشی شده بودند طی ۱۱ روزی که در تنش ۲۵ درصد بودند به تدریج و تا سه برابر میزان پرولین در برگ و ریشه آن افزایش نشان می‌دهد. بسیاری از گزارش‌ها در مورد تجمع پرولین در بادام‌زمینی، آفتابگردان، فلفل و سیب‌زمینی در شرایط خشکی وجود دارد (٤۲، ٤۳، ٤٤). در *Rosa damascena* میزان تجمع پرولین در تنش ۵۰ درصد و تنش ۲۵ درصد بالاتر از *Rosa canina* می‌باشد. در واقع به‌طورکلی، ظرفیت پرولین به نوع و شدت تنش‌ها و گونه‌های گیاهی بستگی دارد (٤۵، ٤٦). نکته جلب توجه این است که این میزان افزایش به ٤ برابر در گیاهان محلول‌پاشی شده با اسید جاسمونیک در مقایسه با شاهد محلول‌پاشی شده با آب مقطر پس از ٤ روز در تنش ۲۵ درصد رسیده است. این افزایش میزان پرولین در شاخساره و ریشه مشابه بوده است. به هر حال در گیاهانی که رطوبت نرمال ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه بودند در اثر محلول‌پاشی اسید جاسمونیک این سطح از این تغییرات را نشان ندادند. بنابراین در شرایط تنش خشکی شدید، نه تنها خشکی در گل‌محمدی در افزایش میزان پرولین ریشه و شاخساره مؤثر است بلکه به دلیل ارتباط تنگاتنگی میان اسید جاسمونیک و خشکی، به‌نظر می‌رسد، اسید جاسمونیک اثر هم‌افزایی با خشکی در تولید پرولین دارد. اسید جاسمونیک با تنظیم افزایشی بیان ژن‌های پروتئین‌های بازدارنده به‌ویژه پرولین سبب افزایش میزان این آمینواسید در گیاه می‌شود (٤۷). نکته قابل تامل مربوط به اثر مهارکنندگی اسید سالیسیلیک در تولید میزان پرولین برگ و شاخساره است. نتایج بیانگر این است که ترکیب اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک میزان پرولین ریشه و شاخساره را به نصف میزان تولید شده در گیاهان محلول‌پاشی شده با آب مقطر در تنش ۲۵ درصد کاهش می‌دهد و این میزان پرولین بسیار نزدیک به میزانی است که در گیاهان قرار گرفته در رطوبت ۱۰۰ درصد قابل مشاهده است. اگرچه نتایج اصلی ما بیانگر این است که بدون توجه به تنش خشکی اسید جاسمونیک منجر به افزایش پرولین در برگ و ریشه می‌گردد ولی این اثر افزایش در شرایط تنش خشکی بسیار ملموس‌تر از شرایط رطوبت ۱۰۰ درصد خاک است که خود بیانگر ارتباط نزدیک میان تنش خشکی و اسید جاسمونیک و اسید سالیسیلیک است. با این وجود اثر مهارکنندگی آن بر روی خشکی به‌طور مجزا نیاز به بررسی خواهد داشت. در مجموع به نظر می‌رسد که اثر ترکیبی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک در تعدیل تنش خشکی ۲۵ درصد ظرفیت زراعی رخ داده بسیار مؤثر عمل نموده و توانسته میزان پرولین تولید شده در شرایط تنش را متعادل نماید و حتی از میزان نشت یونی به میزان زیادی بکاهد. گرچه پرولین در همه اندام‌های گیاه کامل در طی تنش خشکی تجمع می‌یابد ولی نتایج ما بیانگر این است که تجمع پرولین مشاهده شده در ریشه گل‌محمدی بیش‌تر از برگ این گیاه است

(شکل ۱، تنش ۲۵ درصد آب مقطر). افزایش هم‌زمان تولید پرولین در ریشه به احتمال مربوط به انتقال سریع آن از برگ به ریشه است. نظر به نبود کلروفیل در ریشه که به عنوان اولین جایگاه تولید پیش‌ساز تنظیم‌کننده رشد اسید جاسمونیک یعنی OPDA (oxylipin 12-oxo-phytodienoic acid) عمل می‌کند، به نظر می‌رسد که اسید جاسمونیک از طریق مسیر پیام‌رسانی می‌تواند تولید و تجزیه آن را در ریشه متأثر کند. این فرض با در نظر گرفتن این واقعیت است که تولید پرولین در سلول‌های فاقد کلروفیل امکان‌پذیر است و به‌طور مستقیم به کلروفیل وابسته نیست. در شرایط تنش، تغییرات متابولیکی در پرولین به روش‌های مختلف آسیب سلول را کاهش می‌دهد. این اسید آمینه می‌تواند به عنوان یک پروتئین همراه و اسمولیت عمل کند (۴۸).

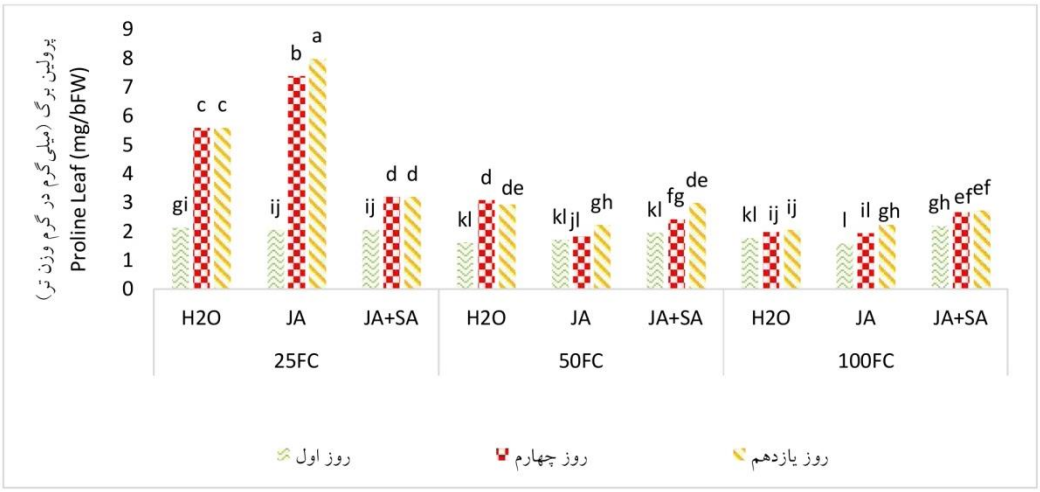
جدول ۱- تجزیه واریانس صفات ریخت‌شناسی و زیست‌شیمیایی گل‌محمدی.

Table 1. Analysis of variance of morphological and phytochemical traits of *Rosa damascene*.

منابع تغییرات	درجه آزادی df	ارتفاع ساقه Stem height	وزن تر ریشه Root wet weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	نشت یونی Ion leakage	پرولین برگ Proline leaves	پرولین ریشه Proline root
بلوک Block	2	339.04**	0.4537^{ns}	0.1146^{ns}	102.5882^{ns}	0.0593^{ns}	0.1335^{ns}
تنش خشکی Drought stress	2	384.147**	7.9896**	0.7044*	45.7636**	41.4224**	28.3829**
تنظیم‌کننده رشد Hormone	2	774.4700**	6.31037**	0.7366**	962.2866*	2.6383**	5.6273**
زمان برداشت Harvest time	2	280.8618*	11.07042**	2.3997**	23.6129**	21.9633**	9.1835**
تنش خشکی × تنظیم‌کننده رشد Drought stress × Hormone	4	102.4519^{ns}	7.8931**	0.4927*	83.5599^{ns}	9.9002**	5.4475**
تنش خشکی × زمان برداشت Drought stress × Harvest time	4	128.0923^{ns}	5.8481**	0.0196^{ns}	72.7685*	8.0447**	6.7091**
تنظیم کننده رشد × زمان برداشت Hormone × Harvest time	4	631.5855**	9.2423**	0.9954**	11.8889**	1.5445**	1.4169**
تنش خشکی× تنظیم‌کننده رشد × زمان برداشت Drought stress × Hormone × Harvest time	8	38.0362^{ns}	7.4457**	1.7125**	36.1901^{ns}	1.9844**	1.5885**
خطا Error	52	70.739	0.2366	0.1731	25.7945	7.3644	13.7976
ضریب تغییرات (درصد) CV%		20.924	18.9384	35.0666	19.3044	7.4671	10.0967

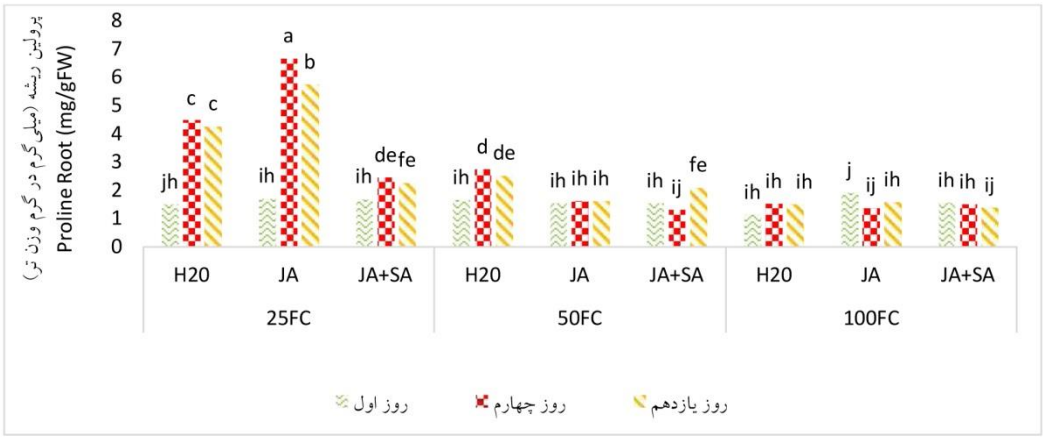
^{ns}، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

^{ns}, * and ** Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively



شکل ۱- الف (A)

Fig. 1 A (A)



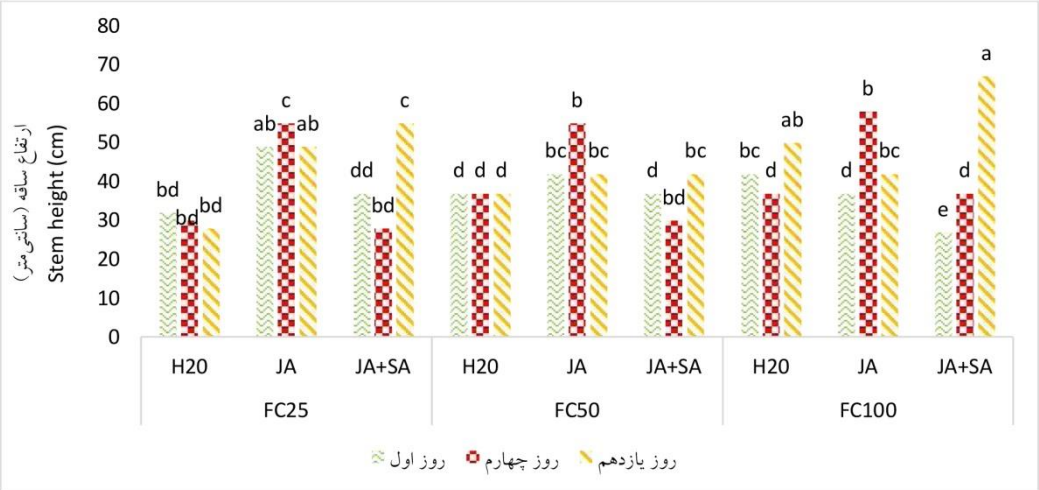
شکل ۱- الف (B)

Fig. 1 A (B)

شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات برهمکنش سطوح خشکی، تنظیم‌کننده رشد و زمان برداشت در پرولین برگ و ریشه گل‌محمدی (حروف مشترک در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند).

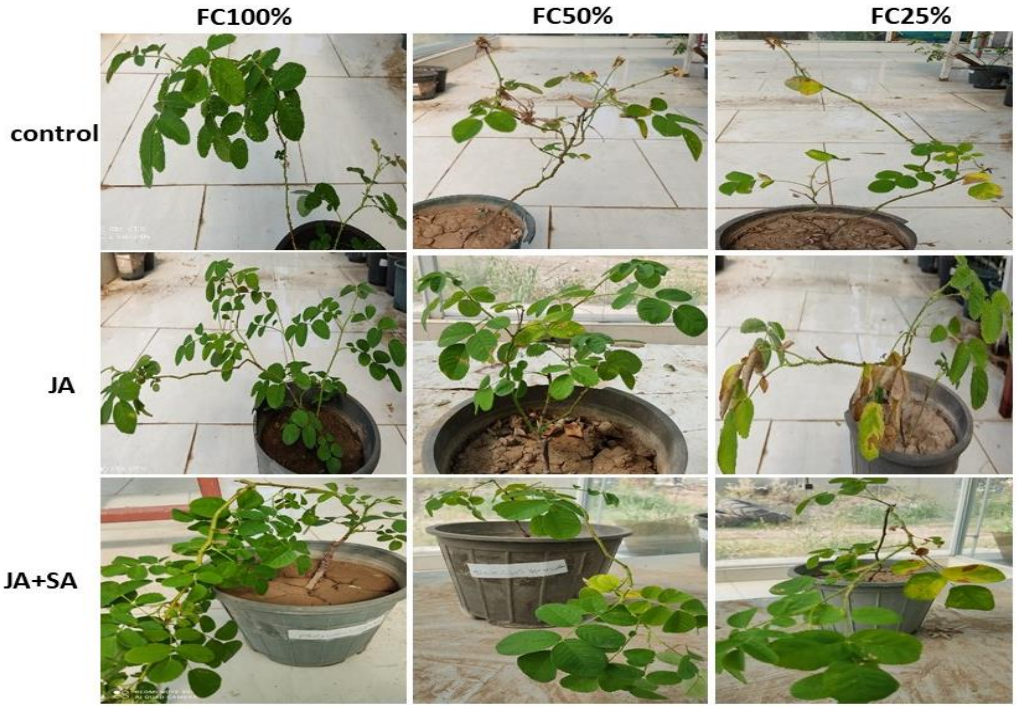
Fig. 1. Comparison mean among drought, hormones and harvest time in *Rosa damascena* leaves and roots proline (Same letters are not significantly different at 5% probability based on LSD test).

ارتفاع ساقه: بر اساس جدول تجزیه واریانس، ارتفاع ساقه بین سطوح مختلف خشکی، تنظیم‌کننده رشد در سطح ۰/۰۱ و زمان برداشت در سطح ۰/۰۵ و اثر برهمکنش تنظیم‌کننده رشد و زمان برداشت در سطح ۰/۰۱ تفاوت معنی‌داری دارد، ولی بین برهمکنش سطوح مختلف خشکی، زمان برداشت و تنظیم‌کننده رشد تفاوت معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۱). طبق نتایج حاصل از مقایسه میانگین بیش‌ترین برهمکنش ارتفاع مربوط به تیمار ترکیب اسید جاسمونیک و اسید سالیسیلیک در روز یازدهم (۶۰ سانتی‌متر) می‌باشد (شکل‌های ۲ و ۳). اثرات تنش‌خشکی بر روی گیاهان ناشی از تغییرات پتانسیل آب می‌باشد (۴۹). یکی از اولین نشانه‌های کمبود آب، کاهش تورژسانس و در نتیجه کاهش رشد توسعه سلول‌ها به‌ویژه در ساقه و برگ‌ها است به‌طوری‌که با کاهش رشد سلول اندازه اندام محدود می‌شود و به همین دلیل است که اولین اثر محسوس تنش خشکی را می‌توان از روی اندازه کوچک‌تر برگ‌ها یا ارتفاع گیاه تشخیص داد (۵۰). کاهش ارتفاع بوته در شرایط تنش خشکی را می‌توان به افزایش اختصاص مواد فتوسنتزی ریشه نسبت به بخش هوایی گیاه دانست که سبب کاهش طول میانگره و در نتیجه کاهش ارتفاع بوته می‌شود. هم‌چنین هرچه میزان تنش بیش‌تر شود گیاه توان جذب آب و مواد غذایی کافی را نخواهد داشت و انرژی که باید صرف رشد و نمو و تقسیم و تکثیر سلولی شود صرف توسعه ریشه و جذب آب و مواد غذایی می‌گردد، در نتیجه گیاهان تنش دیده نسبت به گیاهان رشد یافته در شرایط بدون تنش رشد کم‌تری نشان می‌دهند. مطالعات انجام شده در گل سوسن، ذرت، دیفن باخیا و برنج مشخص شده است که ارتفاع گیاه تحت تنش خشکی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. در مطالعه *Mathiola incana* (شب‌بو معمولی)، محتوای نسبی آب با افزایش تنش خشکی به‌طور قابل‌توجهی تغییر نکرد، اما ارتفاع گیاه، وزن تازه ساقه، وزن خشک ساقه، وزن تازه ریشه و وزن خشک ریشه همگی به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. نتایج مشابهی با اعمال تیمار اسید جاسمونیک در بهبود ارتفاع گیاه گوجه‌فرنگی گزارش شده است (۵۱). بنابراین به‌نظر می‌رسد که اسید جاسمونیک طویل شدن و تقسیم سلولی را به همراه مواد دیگری مانند اکسین تنظیم کند و با افزایش میزان تقسیم سلولی مریستم انتهایی ریشه‌های اولیه سبب افزایش رشد طولی گیاه می‌شود. افزایش رشد در اثر کاربرد اسید سالیسیلیک نیـز در سویا (۵۲) و ذرت (۵۳) گزارش شده است. در پژوهشی دیگر مشخص شد اسید سالیسیلیک تقسیم سلولی را در درون مریستم گیاهچه گندم افزایش داده و رشد گیاه را بهبود بخشید (۵۴).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح خشکی، تنظیم‌کننده رشد و زمان برداشت بر ارتفاع ساقه گل‌محمدی (حروف مشترک در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند).

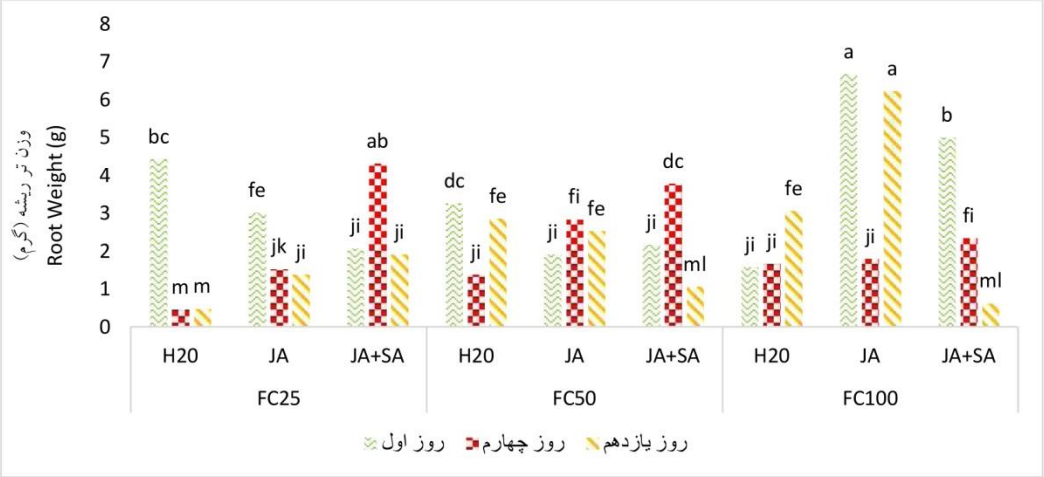
Fig. 2. Comparison mean among drought, hormones and harvest time in *Rosa damascena* stem length (Same letters are not significantly different at 5% probability based on LSD test).



شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح خشکی، تنظیم‌کننده رشد و زمان برداشت بر ارتفاع ساقه گل‌محمدی (حروف مشترک در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند).

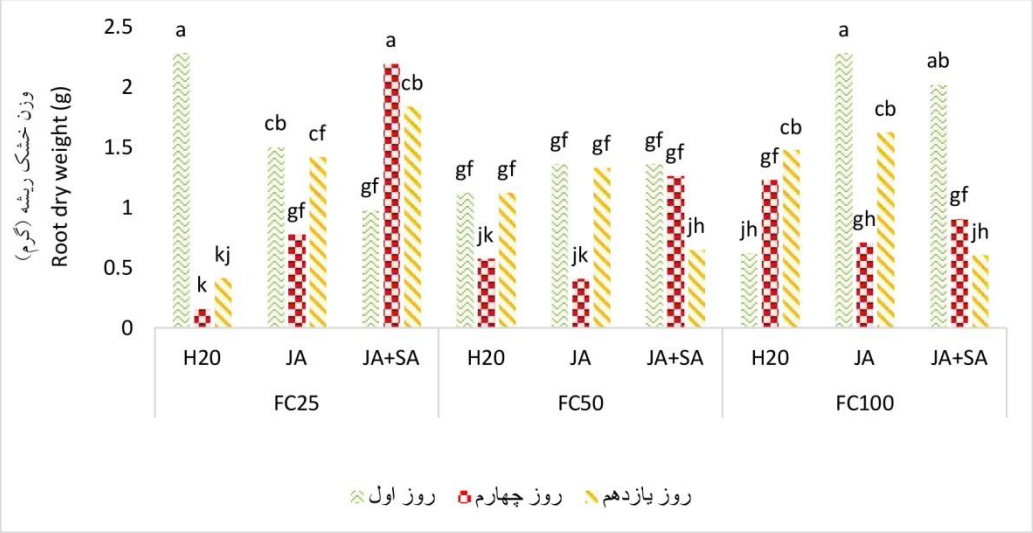
Fig. 3. Comparison mean among drought, hormones and harvest time in *Rosa damascena* stem length (Same letters are not significantly different at 5% probability based on LSD test).

ترکیب اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک در تعدیل وزن تر و خشک ریشه مؤثر است: به‌طوری‌که در جدول تجزیه واریانس مربوط به وزن تر ریشه‌ها مشاهده می‌شود بین همه تیمارها و اثرات متقابلشان در سطح ۰/۰۱ و وزن خشک ریشه در تیمار تنظیم‌کننده رشد، زمان برداشت و اثرات متقابل تنش و تنظیم‌کننده رشد، تنظیم‌کننده رشد و زمان برداشت در سطح ۰/۰۱ اختلاف معنی‌داری وجود دارد ولی بین اثرات متقابل تنش و زمان برداشت اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۱). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با کاهش رطوبت خاک، وزن تر و وزن خشک ریشه کاهش می‌یابد به گونه‌ای که بیش‌ترین اثر متقابل وزن تر ریشه مربوط به تیمار شاهد اسید جاسمونیک در روز اول (٦/٦٧ گرم) می‌باشد (شکل‌های ٤ الف و ٥). هم‌چنین بیش‌ترین وزن خشک ریشه مربوط به تیمار ۲۵ درصد ظرفیت زراعی روز اول (۲/۲۸ گرم) می‌باشد (شکل ٤ ب). هم‌چنین کاهش وزن تر تحت شرایط خشکی ممکن است به دلیل سرکوب تقسیم سلول و رشد آن در نتیجه فشار تورژسانس پایین و محدود شدن ترکیباتی مانند سیتوکینین‌ها و افزایش ترکیباتی مانند آبسیزیک اسید باشد که بر تقسیم سلولی مؤثر می‌باشند (۵۵). در تنش خشکی ریشه گیاهان به عنوان اندام‌های جذب‌کننده آب بسیار با اهمیت هستند (٥٦). ریشه‌های توسعه یافته می‌توانند به گیاهان در جذب و استفاده کامل از آب ذخیره شده در خاک کمک کنند تا گیاهان بتوانند از دوره خشکی جان سالم به در ببرند (۵۷). علاوه بر این، پژوهش‌ها نشان داده است که آب عامل اصلی محیطی است که بر رشد ریشه گیاه تأثیر می‌گذارد (۵۸). بنابراین تغییرات ریخت‌شناسی ریشه گیاهان در مناطق خشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تنظیمات سیستم ریشه مانند ریشه‌های موئین و تراکم ریشه می‌تواند به‌میزان قابل‌توجهی بر کمبود آب گیاهان اثر بگذارد. تنش خشکی می‌تواند باعث کاهش عمر ریشه‌های موئین و در نهایت مرگ نهال‌های پنبه شود (۵۹). گیاهان می‌تواند پیچیدگی و طویل شدن ریشه را افزایش دهند، زاویه شاخه‌های ریشه را کاهش دهند و منجر به سیستم ریشه‌های عمیق‌تری شوند تا با تنش خشکی سازگار شوند (٦٠). جاسمونات‌ها به‌طور معمول در برگ‌های جوان، گل‌ها و میوه‌ها به فراوانی یافت می‌شوند و موجب کاهش خسارات ناشی از تنش‌های زنده و محیطی در گیاه هدف می‌شود (٦١). اسید جاسمونیک تقسیم سلولی را درون مریستم گیاه افزایش می‌دهد و از این‌رو باعث افزایش رشد و وزن زیست‌توده می‌گردد. اسپری اسید سالیسیلیک روی بخش هوایی گیاهان ریحان و مرزنگوش باعث افزایش وزن خشک ریشه گیاه شد (٦٢). هم‌چنین گزارش شده است که متیل‌جاسمونات وزن خشک سیستم ریشه‌ای را در کنگر فرنگی افزایش داد (٦٣). که مشابه نتایج این پژوهش می‌باشد. طی پژوهشی تأثیر غلظت‌های مختلف اسید جاسمونیک بر پارامترهای مختلف گل جعفری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت‌های مختلف اسید جاسمونیک به‌طور معنی‌داری سبب افزایش وزن گل خشک، ارتفاع بوته و وزن هزاردانه و وزن تر سیستم ریشه‌ای این گیاه شد (٦٤). استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی به گیاه کمک می‌کنند تا بر عوامل بازدارنده رشدی غلبه کنند (٦٥). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با افزایش تنظیم‌کننده‌های رشد رشد مانند اکسین و سیتوکنین باعث بهبود طول ریشه از طریق تأثیر بر مریستم انتهایی ریشه می‌شود (٦٦).



شکل ٤- الف (A)

Fig. 4 A (A)



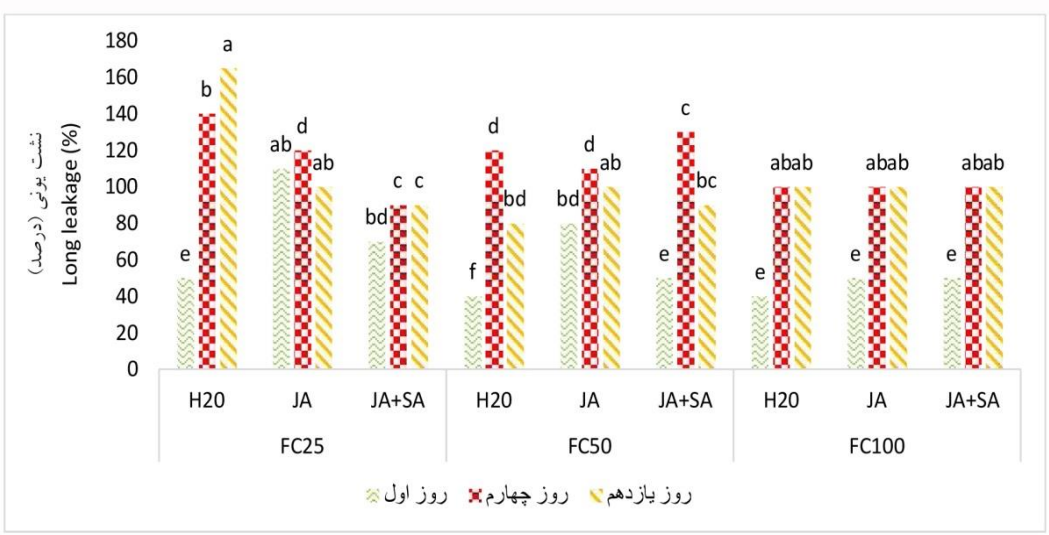
شکل ٤- الف (B)

Fig. 4 A (B)

شکل ٤- مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح خشکی، تنظیم‌کننده رشد و زمان برداشت بر وزن تر و خشک ریشه گل‌محمدی (حروف مشترک در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند).

Fig. 4. Comparison mean among drought, hormones and harvest time in *Rosa damascena* fresh and dry weight of root (Same letters are not significantly different at 5% probability based on LSD test).

نشت یونی: به‌طوری‌که در جدول تجزیه واریانس مربوط به نشت یونی مشاهده می‌شود بین تیمارهای تنش، تنظیم‌کننده رشد، زمان برداشت و اثرات متقابل تنش و زمان برداشت، تنظیم‌کننده رشد و زمان برداشت در سطح ۰/۰۱ اختلاف معنی‌داری وجود دارد ولی بین اثرات متقابل تنش، تنظیم‌کننده رشد و زمان برداشت اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۱). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد (شکل ۵) که تیمار ترکیبی اسید جاسمونیک به همراه اسید سالسیلیک میزان نشت یونی را در شرایط تنش نسبت به تیمار اسید جاسمونیک تنها کاهش داد (شکل ٦). حفظ تمامیت غشاء سلولی طی شرایط تنش، نشانه‌ای از وجود سازوکارهای کنترلی در تحمل به پسابیدگی است. تنش‌های محیطی یکسری تغییرات را در فسفولیپیدهای غشاء ایجاد می‌کند، این تغییرات مشابه تنش سرما در دنباله‌های اسید چرب ایجاد می‌شود و در این تنش میزان اسیدهای چرب غیراشباع افزایش می‌یابد. در تنش‌های شدید بعضی از قسمت‌های فسفولیپیدهای دولایه‌ای غشاء حالت هگزاگونال (شش وجهی) و ساختار غشاء به ساختار منفذدار تبدیل و نشت مواد رخ می‌دهد (٦٧). غشاهای سلولی و اندامک‌ها، اولین محل آسیب به سلول‌ها در شرایط تنش توسط گونه‌های فعال اکسیژن هستند (٦٧). رادیکال‌های سوپراکسید ایجاد شده در شرایط تنش خشکی باعث پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء و افزایش محتوای مالون دی‌آلدئید و در نتیجه آسیب به غشاهای سلولی می‌شوند (٦٨). حفظ پایداری غشای سلولی در طی تنش، نقش محوری در افزایش تحمل گیاه دارد و شاخص مناسبی از میزان تحمل گیاه به تنش است (٦٩). دلیل افزایش میزان نشت یونی با افزایش شدت تنش کم‌آبی این است که در شرایط تنش، رونویسی ژن‌های دخیل در تولید آنزیم‌های مرتبط با پراکسیداسیون لیپیدی و نیز تولید انواع اکسیژن فعال افزایش و میزان آسیب به غشاهای سلولی افزایش می‌یابد که در نتیجه آن پایداری غشا کاهش یافته و باعث افزایش نشت الکترولیت می‌شود (۷۰). افزایش نشت الکترولیت تحت تنش در گیاه ماریتیغال گزارش شده است (۷۱). اسید سالیسیلیک با مهار گونه‌های فعال اکسیژن باعث کاهش آسیب به غشای سلولی و کاهش نشت یونی می‌گردد (۷۲). کاهش نشت یونی در گیاه گوجه‌فرنگی تحت تیمار با اسید سالیسیلیک گزارش شده است (۷۳). کاهش خسارت غشاء در اثر کاربرد اسید سالیسیلیک که به‌عنوان راه اصلی برای افزایش مقاومت به خشکی در گیاه شناخته شده است، ممکن است با تولید آنتی‌اکسیدان در ارتباط باشد که تولید آنتی‌اکسیدان پاسخی از گیاه برای کاهش خسارت اکسید شدن است. اعمال اسید سالیسیلیک در کاهش نشت یونی به وجود آمده در اثر اسید جاسمونیک تحت تنش خشکی با نتایج گزارش شده پیشین در خصوص اثر اسید سالیسیلیک در بهبود پایداری غشاء در برابر تنش‌های اکسیداتیو مطابقت دارد (٧٤). در مورد نقش اسید سالیسیلیک بر نشت الکترولیت گزارش‌های متعددی وجود دارد ازجمله این‌که اسید سالیسیلیک در غلظت ۰/۱ میلی‌مولار سبب کاهش نشت یونی در گوجه‌فرنگی نسبت به شاهد شد (۷۵). گزارش شده است که اسید سالیسیلیک با مهار گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر، از آسیب به اسیدهای چرب جلوگیری و نفوذپذیری و نشت یونی غشاء را کاهش و از غشاء تیلاکوئیدی در مقابل تنش محافظت می‌کند (۷۲).



شکل ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح خشکی، تنظیم‌کننده رشد و زمان برداشت بر نشت یونی برگ گل‌محمدی (حروف مشترک در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند).

Fig. 5. Comparison mean among drought, hormones and harvest time on leaf ion leakage of *Rosa damascena* (Same letters are not significantly different at 5% probability based on LSD test).

نتیجه‌گیری کلی

تولید پرولین برگ و شاخساره در گل‌محمدی در شرایط رطوبت نرمال خاک به‌وسیله اسید جاسمونیک و اسید سالیسیلیک خارجی متأثر نمی‌شود. با کاهش میزان رطوبت خاک به کم‌تر از نصف ظرفیت مزرعه میزان پرولین به شدت افزایش می‌یابد. این افزایش با کاربرد اسید جاسمونیک به‌صورت خارجی بیش‌تر تشدید می‌شود اما کاربرد اسید سالیسلیک میزان تولید پرولین ریشه و برگ را به خوبی تعدیل می‌کند. این اثر تعدیل‌کنندگی تنش خشکی به وسیله خنثی نمودن اثر اسید جاسمونیک در میزان نشت یونی سلول و افزایش وزن تر و خشک ریشه مشاهده شد. مهار تولید پرولین برگ و ریشه، افزایش وزن تر و خشک ریشه و ارتفاع ساقه و هم‌چنین تعدیل نشت یونی در برگ گل‌محمدی تحت تنش خشکی در گیاهان محلول‌پاشی شده با اسید جاسمونیک تنها توسط اسید سالیسیلیک انجام می‌شود.

منابع

1. Gil, C. S., Lim, S. T., Lim, Y. J., Jung, K. H., Na, J. K. & Eom, S. H. (2020). Volatile content variation in the petals of cut roses during vase life. *Scientia Horticulture*, 261, 108960.
2. Kiani, A., Hellquist, E., Ahlqvist, K., Gedeborg, R. & Byberg, L. (2010). Prevention of soccer-related knee injuries in teenaged girls. *Archives of internal medicine*, 170 (1), 43-49.
3. Naquvi, K. J., Ansari, S. H., Ali, M. & Najmi, A. K. (2014). Volatile oil composition of *Rosa damascena* Mill. (*Rosaceae*). *Journal of Pharmacognosy and Phytochem*. 2 (5), 177-181.
4. Kafi, M. & Riazi, Y. (2002). Cultivation of *Rosa damascena* Mill. and rose water production. Ministry of Agricultural-Jihad pub, Tehran, Iran.
5. Pal, P. K. (2013). Evaluation, genetic diversity, recent development of distillation method, challenges and opportunities of *Rosa damascena*: A review. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 16 (1), 1-10.

6. Yousefi, S., Mihalache, C., Kozlowski, E., Schmid, I. & Simon, H. U. (2009). Viable neutrophils release mitochondrial DNA to form neutrophil extracellular traps. *Cell Death & Differen*. 16(11), 1438-1444.
7. Nikbakht, A. & Kafi, M. (2004). A study on the relationships between Iranian people and Damask rose (*Rosa damascena*) and its therapeutic and healing properties. In VIII International People-Plant Symposium on Exploring Therapeutic Powers of Flowers, Greenery and Nature 790 (pp. 251-254).
8. Kerchev, P., van der Meer, T., Sujeeth, N., Verlee, A., Stevens, C. V., Van Breusegem, F. & Gechev, T. (2020). Molecular priming as an approach to induce tolerance against abiotic and oxidative stresses in crop plants. *Biotechnology Advance*, 40, 107503.
9. Khaleghi, A., Naderi, R., Brunetti, C., Maserti, B. E., Salami, S. A. & Babalar, M. (2019). Morphological, physiochemical and antioxidant responses of *Maclura pomifera* to drought stress. *Scientific Reports*, 9 (1), 19250.
10. Kaur, G. & Asthir, B. (2017). Molecular responses to drought stress in plants. *Biologia Plantarum*, 61, 201-209.
11. Hasan, M. M., Skalicky, M., Jahan, M. S., Hossain, M. N., Anwar, Z., Nie, Z. F. & Fang, X. W. (2021). Spermine: its emerging role in regulating drought stress responses in plants. *Cells*, 10 (2), 261.
12. El-Esawi, M. A. & Alayafi, A. A. (2019). Overexpression of StDREB2 transcription factor enhances drought stress tolerance in cotton (*Gossypium barbadense* L.). *Genes*, 10 (2), 142.
13. Saffari, M., Oveisi, M. & Zarghami, R. (2015). Investigation of the effect of putrescia polyamine on some traits of *Thymus vulgaris* L. In conditions of water shortage. *Agriculture Research*, 12 (4), 279-289.
14. Zhang, C., Yang, H., Wu, W. & Li, W. (2017). Effect of drought stress on physiological changes and leaf surface morphology in the blackberry. *Brazilian Journal of Botany*, 40, 625-634.
15. Iqbal, N., Hussain, S., Raza, M. A., Yang, C. Q., Safdar, M. E., Brestic, M. & Liu, J. (2019). Drought tolerance of soybean (*Glycine max* L. Merr.) by improved photosynthetic characteristics and an efficient antioxidant enzyme activities under a split-root system. *Frontier in Physiology*, 10, 786.
16. Nxele, X., Klein, A. & Ndimba, B. K. (2017). Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. *South African Journal of Botany*, 108, 261-266.
17. Sohag, A. A. M., Tahjib-Ul-Arif, M., Brestic, M., Afrin, S., Sakil, M. A., Hossain, M. T. & Hossain, M. A. (2020). Exogenous salicylic acid and hydrogen peroxide attenuate drought stress in rice. *Plant, Soil and Environ*. 66 (1), 7-13.
18. Szabados, L. & Savouré, A. (2010). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in plant Science*, 15 (2), 89-97.
19. Trovato, M., Forlani, G., Signorelli, S. & Funck, D. (2019). Proline metabolism and its functions in development and stress tolerance. Osmoprotectant-mediated abiotic stress tolerance in plants. *Recent Advances and Future Perspectives*, 41-72.
20. Florian, R. T., Kraft, F., Leitão, E., Kaya, S., Klebe, S., Magnin, E. & Depienne, C. (2019). Unstable TTTTA/ TTTCA expansions in MARCH6 are associated with Familial Adult Myoclonic Epilepsy type *Nature Commun*. 10 (1), 4919.
21. Freitas, C. M. D., Barcellos, C., Asmus, C. I. R. F., Silva, M. A. D. & Xavier, D. R. (2019). Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. *Cadernos de Saúde Pública*, 35.
22. Aswani, V., Rajsheel, P., Bapatla, R. B., Sunil, B. & Raghavendra, A. S. (2019). Oxidative stress induced in chloroplasts or mitochondria promotes proline accumulation in leaves of pea (*Pisum sativum*): another example of chloroplast-mitochondria interactions. *Protoplasma*, 256, 449-457.
23. Furlan, A. L., Bianucci, E., Giordano, W., Castro, S. & Becker, D. F. (2020). Proline metabolic dynamics and

implications in drought tolerance of peanut plants. *Plant Physiol. Biochem*. 151, 566-578.

24. Freitas, C. M. D., Barcellos, C., Asmus, C. I. R. F., Silva, M. A. D. & Xavier, D. R. (2019). Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. Cadernos de Saúde Pública, 35.
25. Freitas, C. M. D., Barcellos, C., Asmus, C. I. R. F., Silva, M. A. D. & Xavier, D. R. (2019). Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. *Cadernos de Saúde Pública*, 35.
26. Seneviratne, M., Rajakaruna, N., Rizwan, M., Madawala, H. M. S. P., Ok, Y. S. & Vithanage, M. (2019). Heavy metal-induced oxidative stress on seed germination and seedling development: a critical review. *Environmental geochemistry and health*, 41, 1813-1831.
27. Hu, Z., Deibert, B. J. & Li, J. (2014). Luminescent metal–organic frameworks for chemical sensing and explosive detection. *Chemical Society Review*. 43 (16), 5815-5840.
28. Verma, V., Ravindran, P. & Kumar, P. P. (2016). Plant hormone-mediated regulation of stress responses. *BMC plant biology*, 16, 1-10.
29. Hura, T., Dziurka, M., Hura, K., Ostrowska, A., Dziurka, K. & Gadzinowska, J. (2017). Wheat and rye genome confer specific phytohormone profile features and interplay under water stress in two phenotypes of triticale. *Plant Physiology and Biochemistry*, 118, 494-509.
30. Hura, T., Dziurka, M., Hura, K., Ostrowska, A., Dziurka, K. & Gadzinowska, J. (2017). Wheat and rye genome confer specific phytohormone profile features and interplay under water stress in two phenotypes of triticale. *Plant Physiology Biochemistery*, 118, 494-509.
31. Kohli, S. K., Handa, N., Sharma, A., Gautam, V., Arora, S., Bhardwaj, R. & Ahmad, P. 2018. Interaction of 24-epibrassinolide and salicylic acid regulates pigment contents, antioxidative defense responses, and gene expression in *Brassica juncea* L. seedlings under Pb stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 15159-15173.
32. Kang, S. M., Jung, H. Y., Kang, Y. M., Yun, D. J., Bahk, J. D., Yang, J. K. & Choi, M. S. (2004). Effects of methyl jasmonate and salicylic acid on the production of tropane alkaloids and the expression of PMT and H6H in adventitious root cultures of Scopolia parviflora. *Plant Science*, 166 (3), 745-751.
33. Liu, Y., Wang, L., Li, Y., Li, X. & Zhang, J. (2019). Proline metabolism-related gene expression in four potato genotypes in response to drought stress. *Biology Plant*, 63, 757-764.
34. Raskin, I. (1992). Role of salicylic acid in plants. *Annual Review of Plant Boil*. 43 (1), 439-463.
35. Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A. & Khan, N. A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Fron.in Plant Science*, 6, 462.
36. Shi, Q. & Zhu, Z. (2008). Effects of exogenous salicylic acid on manganese toxicity, element contents and antioxidative system in cucumber. *Environ. Experimental Botany*, 63 (1-3), 317-326.
37. Dat, J. F., Lopez-Delgado, H., Foyer, C. H. & Scott, I. M. (1998). Parallel changes in H_2O_2 and catalase during thermotolerance induced by salicylic acid or heat acclimation in mustard seedlings. *Plant Physiology*, 116 (4), 1351-1357.
38. Naz, R. & Bano, A. (2013). Influence of exogenously applied salicylic acid and plant growth promoting rhizobacteria inoculation on the growth and physiology of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under salt stress. *Pakistan. Journal of Botany*, 45(2), 367-373.
39. Lutts, S., Kinet, J. M. & Bouharmont, J. (1995). Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. *Journal of Experimental Botany*, 46 (12), 1843-1852.
40. Murata, T. & Tatsumi, Y. (1979). Ion leakage in chilled plant tissues. Low

temperature stress in crop plants. *The Role of the Membrane*, 141151.
41. Bates, L. S., Waldren, R. A. & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*, 39, 205-207.
42. Haworth, M., Killi, D., Materassi, A., Raschi, A. & Centritto, M. (2016). Impaired stomatal control is associated with reduced photosynthetic physiology in crop species grown at elevated [CO_2]. *Fron. Plant Science*, 7, 1568.
43. Lutts, S., Kinet, J. M. & Bouharmont, J. (1995). Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. *Journal of Experimental Botany*, 46 (12), 1843-1852.
44. Mohammadi, H., Hazrati, S. & Ghorbanpour, M. (2020). Tolerance mechanisms of medicinal plants to abiotic stresses. In Plant life under changing environment (pp. 663-679). Academic Press.
45. Liang, J. J., Qu, B. Y., Suganthan, P. N. & Hernández-Díaz, A. G. (2013). Problem definitions and evaluation criteria for the CEC special session on real-parameter optimization. Computational Intelligence Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou, China and Nanyang Technological University, Singapore, Technical Report, 201212 (34), 281-295.
46. Rizzi, Y. S., Monteoliva, M. I., Fabro, G., Grosso, C. L., Laróvere, L. E. & Alvarez, M. E. (2015). P5CDH affects the pathways contributing to Pro synthesis after ProDH activation by biotic and abiotic stress conditions. *Fron. Plant Science*, 6, 572.
47. Wang, K., Jin, P., Cao, S., Shang, H., Yang, Z. & Zheng, Y. (2009). Methyl jasmonate reduces decay and enhances antioxidant capacity in Chinese bayberries. *Journal of Agriculture Food Chemistry*, 57 (13), 5809-5815.
48. Rejeb, K. B., Abdelly, C. & Savouré, A. (2014). How reactive oxygen species and proline face stress together. *Plant Physiol. Biochem*. 80, 278-284.
49. Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Aslam, M. & Lee, D. J. (2016). Silicon fertilization improves the maize (*Zea mays* L.) performance under limited moisture supply. *Cereal Research Communications*, 44 (1), 172-185.
50. Ashraf, M., Akram, N. A., Arteca, R. N. & Foolad, M. R. (2010). The physiological, biochemical and molecular roles of brassinosteroids and salicylic acid in plant processes and salt tolerance. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29 (3), 162-190.
51. Farzaneh, M. & Tafazoli, A. S. (2014). Methyl jasmonic effect on carotenoid pigments and morphological characters of tomato under salt stress conditions. In The First National Conference on Medicinal Plants and Sustainable Agriculture (Vol. 10, pp. 125-135).
52. Eraslan, F., Inal, A., Gunes, A. & Alpaslan, M. (2007). Impact of exogenous salicylic acid on the growth, antioxidant activity and physiology of carrot plants subjected to combined salinity and boron toxicity. *Sci. Hort.* 113 (2), 120-128.
53. García, M. G., Busso, C. A., Polci, P., García Girou, N. L. & Echenique, V. (2002). Water relations and leaf growth rate of three Agropyron genotypes under water stress. *Bio cell*, 26 (3), 309-317.
54. Shakirova, F. M., Sakhabutdinova, A. R., Bezrukova, M. V., Fatkhutdinova, R. A. & Fatkhutdinova, D. R. (2003). Changes in the hormonal status of wheat seedlings induced by salicylic acid and salinity. *Plant science*, 164 (3), 317-322.
55. Kusaka, M., Lalusin, A. G. & Fujimura, T. (2005). The maintenance of growth and turgor in pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] Leeke) cultivars with different root structures and osmo-regulation under drought stress. *Plant Science*, 168 (1), 1-14.
56. Lobet, G. & Draye, X. (2013). Novel scanning procedure enabling the vectorization of entire rhizotron-grown root systems. *Plant Methods*, 9 (1), 1-11.
57. Gowda, V. R., Henry, A., Yamauchi, A., Shashidhar, H. E. & Serraj, R. (2011). Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. *Field crops research*, 122 (1), 1-13.
58. Cao, N., Wang, C., Li, M., Ren, K. & Lou, W. (2013). Privacy-preserving

multi-keyword ranked search over encrypted cloud data. *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, 25(1), 222-233.
59. Xiao, S., Liu, L., Zhang, Y., Sun, H., Zhang, K., Bai, Z. & Li, C. (2020). Fine root and root hair morphology of cotton under drought stress revealed with RhizoPot. *J. Agron. Crop Science*, 206 (6), 679-693.
60. Yan, S. S., Qiu, Z. K., Yu, B. W., Ming, F. Y., Chen, C. M., Lei, J. J. & Cao, B. H. (2020). Advances in phytohormone auxin response to high temperature. *Acta Hort. Sinica*, 47 (11), 2238-2246.
61. Westfall, C. S., Muehler, A. M. & Jez, J. M. (2013). Enzyme action in the regulation of plant hormone responses. *Journal of Biological Chemistry*. 288 (27), 19304-19311.
62. Gharib, F. A. (2006). Effect of salicylic acid on the growth, metabolic activities and oil content of basil and marjoram. *International Journal of Agriculture. Biology*, 4, 485-492.
63. Abdollahi, A., Farsad-Akhtar, N., Mohajel Kazemi, E. & Kolahi, M. (2023). Investigation of the combined effects of cadmium chloride, silver nitrate, lead nitrate, methyl jasmonate, and salicylic acid on morphometric and biochemical characteristics of St. John's wort. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 29 (2), 173-184.
64. Ataei, N., Moradi, H. & Akbarpour, V. (2013). Growth parameters and photosynthetic pigments of marigold under stress induced by jasmonic acid. *Notulae Scientia Biolog*. 5 (4), 513-517.
65. El-Esawi, M. A. and Alayafi, A. A. (2019). Overexpression of StDREB2 transcription factor enhances drought stress tolerance in cotton (*Gossypium barbadense* L.). *Genes*, 10 (2), 142.
66. Habba, E. E., Abdel Aziz, N. G., Sarhan, A. M. Z., Arafa, A. M. S. & Youssefi, N. M. (2016). Effect of putrescine and growing media on vegetative growth and chemical constituents of *Populus euramericana* plants. *Journal of Innovations in Pharmaceutical and Biological Sciences*, 3 (1), 61-73.
67. Jouyban, Z. (2012). The effects of salt stress on plant growth. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2 (1), 7-10.
68. Pirasteh-Anosheh, H., Emam, Y., Rousta, M. J. & Hashemi, S. E. (2016). Effect of salicylic acid on biochemical attributes and grain yield of barley (*Horedum vulgare* L. cv. Nosrat) under saline conditions. *Iranian Crop Science*, 18 (3), 48-58.
69. Bandeoğlu, E., Eyidoğan, F., Yücel, M. & Avni Öktem, H. (2004). Antioxidant responses of shoots and roots of lentil to NaCl-salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 42, 69-77.
70. Beltrano, J. & Ronco, M. G. (2008). Improved tolerance of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) to drought stress and rewatering by the arbuscular mycorrhizal fungus Glomus claroideum: Effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Plant Physiology*, 20, 29-37.
71. Rezaie Alulu, A., Kheiry, A., Sanikhani, M. & Arghavani, M. (2019). Effect of salicylic acid and glycine betaine foliar application on morpho-physiological characteristics of carla (*Momordica charantia* L.) under water deficit stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 29 (1), 223-235.
72. Farzaneh, M. & Tafazoli, A. S. (2014). Methyl jasmonic effect on carotenoid pigments and morphological characters of tomato under salt stress conditions. In The First National Conference on Medicinal Plants and Sustainable Agriculture (Vol. 10, pp. 125-135).
73. Stevens, L. A., Coresh, J., Greene, T. & Levey, A. S. (2006). Assessing kidney function-measured and estimated glomerular filtration rate. *New England Journal of Med*. 354 (23), 2473-2483.
74. Ghoulam, C., Foursy, A. & Fares, K. (2002). Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environment Experimental Botany*, 47 (1), 39-50.
75. Singh, B. & Usha, K. (2003). Salicylic acid induced physiological and biochemical changes in wheat seedlings under water stress. *Plant Growth Regulation*, 39, 137-141.