https://ijpb.ui.ac.ir/?lang=en
Journal of Plant Biological Sciences
E-ISSN: 3041-9603
Vol. 17, Issue 2, No. 64, 2025
Document Type: Research Paper
Received: 29/03/2025 Accepted: 06/12/2025

The effect of salinity stress and different planting methods on physiological, biochemical traits and grain yield of *Galega officinalis*

Naser Samsami[1], Jalal Jalilian[1], Esmaeil Gholinezhad*[2], Raheleh Tahmasebi[3]
1. Department of Plant Production and Genetic Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
2. Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran
3. Department of Analytical Chemistry-Chromatography, Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Urmia, Iran.

Abstract
This study aimed to investigate the effects of salinity stress on physiological and biochemical traits and seed yield of the Galega plant, using a randomized complete block design with three replications in three cultivation environments (greenhouse, outdoor pot, and field) in the 2024 crop year at Urmia University. Salinity stress was applied at three levels: 0.1, 5, and 10 dS/m. The analysis of variance showed that salinity stress had a significant effect on all studied traits. In greenhouse conditions, salinity stress at 10 and 5 dS/m led to 45 and 38 percent decreases in carotenoid content, and 56 and 10 percent decreases in chlorophyll b and potassium, respectively. Also, the highest ash percentage (8.10 percent) was observed under salinity stress of 10 dS/m. In outdoor pot conditions, salinity stress of 10 and 5 dS/m also had a significant adverse effect on physiological traits and reduced grain yield by 29% and 4%, respectively. Under these conditions, chlorophyll a, chlorophyll b, and potassium content decreased by 32, 24 and 60%, while carotenoid content increased by 15% at 5 dS/m, but this increased to 19% when salinity stress increased to 10 dS/m. Under field conditions, salinity stress of 10 and 5 dS/m reduced chlorophyll a, potassium, and relative leaf water content by (35 and 8%), (48 and 20%) and (21 and 14%), respectively, compared to conditions without salinity stress. Salinity stress of 10 dS/m decreased the chlorophyll index by 9% compared to the control. Salinity stress of 5 dS/m increased carotenoid content by 12% compared to the control, but at 10 dS/m, carotenoid content increased by 45% compared to the non-salinity stress condition. Salinity stress of 10 and 5 dS/m increased proline content, sodium percentage, electrolyte leakage, and internal leaf temperature by (68 and 59%), (83 and 56%), (6 and 6%) and (23 and 9%), respectively, in field conditions compared to the non-salinity stress condition. The results for field conditions also showed that salinity stress at 10 and 5 dS/m decreased grain yield by 78% and 67%, respectively. Also, cultivation of Galega under field conditions yielded the highest grain yield (2.98 g/plant), while cultivation in open-air pots yielded the lowest (2.13 g/plant). Considering these results, it is suggested that farmers use lower salinity levels (about 5 dS/m) to cultivate Galega to minimize the negative effects of salt stress. These salinity levels maintain higher chlorophyll and carotenoid levels in the plant, thereby improving grain yield.

Keywords: Antioxidant activity, Chlorophyll, Galega, Grain yield, Leaf temperature, Proline, Salinity

*Corresponding Author: e_gholinejad@pnu.ac.ir

3041-9603 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
doi: 10.22108/IJPB.2025.144796.1403

Introduction

Soil salinity is a major abiotic stressor threatening global food security and sustainable crop production (Munns & Tester, 2008). It causes osmotic stress, ionic toxicity, and nutritional imbalances. In this context, identifying tolerant species and optimizing cultivation management are key research priorities. Medicinal plants such as Galega are promising candidates for cultivation under marginal conditions, as environmental stresses can stimulate the production of valuable secondary metabolites (Selmar & Kleinwächter, 2013). Galega is known for its antidiabetic compounds, such as galegine, and a spectrum of bioactive secondary metabolites with antioxidant potential (Jung et al., 2006; Karakaş et al., 2016). However, its agronomic responses to salinity stress remain poorly understood. Plant responses to salinity are complex and can be significantly modulated by the growing environment. Controlled environments, such as greenhouses, offer regulated conditions, whereas field conditions expose plants to a broader range of interacting stressors (Eslami, 2015; Ramos-López et al., 2020). This study was designed to address this knowledge gap. The primary objective was to comprehensively evaluate the physiological, biochemical, and yield responses of Galega to varying salinity levels across three distinct cultivation systems (greenhouse, outdoor pot, and field). We hypothesized that (1) salinity stress would severely impair photosynthetic pigments and grain yield while inducing osmotic and ionic adjustment mechanisms, and (2) the cultivation environment would significantly modulate the intensity of these responses, with field conditions presenting the most significant challenge due to multi-stress interactions.

Materials and Methods

This study was conducted as a two-factor experiment (salinity and cultivation environment) in a randomized complete block design with three replications. Salinity treatments included three levels (0.1, 5, and 10 dS/m), and cultivation environments included a greenhouse (controlled conditions), outdoor pots (imposed root restriction), and field plots. Salinity stress was applied incrementally after plant establishment, with root zone salinity managed through periodic leaching. Measured traits included photosynthetic pigments (following Arnon, 1949; Lichtenthaler, 1987), free proline (Bates et al., 1973), electrolyte leakage, sodium and potassium ion concentrations, physiological parameters (relative leaf water content, chlorophyll index, leaf temperature), and grain yield. Soil properties were also analyzed before and after the experiment. Data were analyzed using analysis of variance in SAS, with mean comparisons performed using Tukey's HSD test at the 5% significance level.

Results and Discussion

Salinity stress significantly affected all physiological, biochemical, and yield traits of Galega, with severity dependent on the environment. Under non-saline conditions, field cultivation yielded the best performance at 2.98 g per plant (Ramos-López et al., 2020). However, under salinity stress, the field yield sharply declined (78% at 10 dS/m). In contrast, outdoor pot culture at moderate salinity (5 dS/m) showed only a 4% yield reduction, indicating relative tolerance. The greenhouse was unsuitable for successful production under stress due to pollination issues. Biochemically, chlorophyll a and b content decreased across all environments, with the most severe decline observed in the field at the highest salinity level, attributed to destabilization of the pigment-protein complex, increased chlorophyllase activity, and oxidative damage (Bistgani et al., 2019; Heidari, 2012). Carotenoid content increased at moderate salinity in both field and pot conditions (Rizwan et al., 2015) but decreased under severe salinity in the field. Proline accumulation increased as a universal salinity response, confirming its important role as an osmoprotectant and signaling molecule (Alvarez et al., 2022; Arteaga et al., 2020). Salinity disrupted ion balance by dramatically increasing sodium and decreasing potassium (Parihar et al., 2015). Potted plants maintained better K^+ /Na^+ balance at moderate salinity. Electrolyte leakage increased, and relative water content decreased, indicating membrane damage and osmotic stress. Internal leaf temperature likely increased due to stomatal closure. Overall, the cultivation environment profoundly influences adaptive responses to salinity.

Conclusion

This research demonstrated that the choice of cultivation method defines the salinity tolerance strategy of Galega officinalis. For maximum yield under non-saline conditions, open-field cultivation is the best option. In contrast, when exposed to moderately saline water (~5 dS/m), outdoor pot culture exhibits greater resilience, maintaining ionic balance and antioxidant activity. If the goal is to enhance secondary medicinal compounds, applying moderate to severe salinity stress in the field can serve as an effective elicitor. Finally, standard greenhouse cultivation is not recommended for grain production under salinity stress.

علوم زیستی گیاهی، سال هفدهم، شمارهٔ پیاپی شصت و چهارم، ۱۴۰۴، صفحهٔ ۸۹- ۱۰۶
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹
تاریخ بررسی مجدد: ۱۴۰۴/۰۹/۱۴
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵
مقاله پژوهشی

تأثیر تنش شوری و روش‌های مختلف کاشت بر صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد دانه گیاه گالگا (*Galega officinalis*)

ناصر صمصامی[۱]، جلال جلیلیان[۱]، اسماعیل قلی نژاد[۲*]، راحله طهماسبی[۳]

[۱] گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

[۲] گروه علمی علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور ، تهران، ایران

[۳] گروه شیمی تجزیه-کروماتوگرافی، جهاد دانشگاهی واحد آذربایجان غربی، ایران

چکیده

پژوهش حاضر، با هدف بررسی اثرات تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد دانه گیاه گالگا به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، در سه محیط کشت (گلخانه، گلدانی در هوای آزاد و مزرعه) در سال زراعی ۱۴۰۲ در دانشگاه ارومیه اجرا شد. تنش شوری در سه سطح، ۰/۱، ۵ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بود. نتایج تجزیه واریانس نشان دادند تنش شوری به‌طور معنی‌داری بر تمامی صفات مورد بررسی تأثیر داشت. در شرایط گلخانه، تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب منجر به کاهش ۴۵ و ۳۸ درصدی محتوای کاروتنوئید و کاهش ۵۶ و ۱۰ درصدی کلروفیل b و پتاسیم شد. همچنین، بالاترین درصد خاکستر (۸/۱۰ درصد) در شرایط تنش شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد. در شرایط گلدانی هوای آزاد، تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر نیز تأثیر منفی قابل توجهی بر صفات فیزیولوژیک داشت و به ترتیب عملکرد دانه را ۲۹ و ۴ درصد کاهش داد. در این شرایط، محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و درصد پتاسیم به میزان ۳۲، ۲۴ و ۶۰ درصد کاهش یافتند و از سوی دیگر، محتوای کاروتنوئید در تنش شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر ۱۵ درصد افزایش نشان داد، اما با افزایش تنش شوری به ۱۰ دسی‌زیمنس، این مقدار به ۱۹ درصد افزایش یافت. در شرایط کاشت مزرعه، تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری محتوای کلروفیل a، درصد پتاسیم و محتوای نسبی آب برگ را به‌ترتیب به‌میزان (۳۵ و ۸ درصد)، (۴۸ و ۲۰ درصد) و (۲۱ و ۱۴ درصد) در شرایط مزرعه کاهش داد. تنش شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد، شاخص کلروفیل را به‌میزان ۹ درصد کاهش داد. تنش شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد، محتوای کاروتنوئید را ۱۲ درصد افزایش داد، امّا با افزایش تنش شوری تا ۱۰ دسی زیمنس بر متر محتوای کاروتنوئید به‌میزان ۴۵ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری افزایش یافت. تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری محتوای پرولین، درصد سدیم، نشت الکترولیت و دمای داخلی برگ را به‌ترتیب به‌میزان (۶۸ و ۵۹ درصد)، (۸۳ و ۵۶ درصد)، (۶ و ۶ درصد) و (۲۳ و ۹ درصد) در شرایط مزرعه افزایش داد. همچنین نتایج مربوط به شرایط مزرعه نشان دادند تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب عملکرد دانه را ۷۸ و ۶۷ درصد کاهش داد. همچنین، کشت گالگا در شرایط مزرعه بالاترین عملکرد دانه (۲/۹۸ گرم در هر بوته) را به خود اختصاص داد، از سوی دیگر، کشت در گلدان‌های هوای آزاد کمترین عملکرد (۲/۱۳ گرم در هر بوته) را نشان داد. با توجه به این نتایج، پیشنهاد می‌شود که کشاورزان برای کشت گیاه گالگا از سطوح شوری پائین‌تر (حدود ۵ دسی‌زیمنس بر متر) استفاده کنند تا تأثیرات منفی تنش شوری به حداقل برسد. این سطوح شوری منجر به حفظ محتوای کلروفیل و کاروتنوئید بیشتری در گیاه می‌شود و در نتیجه به بهبود عملکرد دانه کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پرولین، شوری، دمای برگ، عملکرد دانه، فعالیت آنتی اکسیدانی، کلروفیل، گالگا

*Corresponding Author: e_gholinejad@pnu.ac.ir

3041-9603 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
doi: 10.22108/IJPB.2025.144796.1403

مقدمه

محیط زیست و تنش‌های مرتبط با آن، به ویژه شوری، به عنوان یکی از موانع اصلی در تولید پایدار محصولات کشاورزی به شمار می‌رود. شوری خاک با ایجاد استرس اسمزی، سمّیت یونی و اختلال در تعادل غذایی، فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و در نهایت منجر به کاهش کمّی و کیفی عملکرد می شود (Munns & Tester, 2008). در این راستا، شناسایی گیاهان متحمّل و تعیین راهکارهای مدیریتی برای کشت در زمین‌های شور، از اولویت‌های پژوهشی محسوب می‌شود. گیاهان دارویی به علّت دارا بودن ترکیبات ثانویه ارزشمند، گزینه‌های مناسبی برای کشت در چنین شرایطی هستند، زیرا تنش‌های محیطی می‌توانند محرک تولید این ترکیبات ارزشمند باشند (Selmar & Kleinwächter, 2013).

در میان گیاهان دارویی، گالگا (*Galega officinalis* L.) به عنوان گیاهی علفی و چندساله از تیره نخود (Fabaceae) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این گیاه به علّت دارا بودن ترکیبات دارویی به‌ویژه گوانیدین و مشتقات آن مانند گالگین، از دیرباز در طب سنتی برای درمان دیابت مورد استفاده قرار گرفته است (Omidbeigi, 2011). پژوهش‌های داروئی جدید، خواص ضد دیابت، ادرارآور، ضد باکتری و ضد التهابی این گیاه را تأئید کرده‌اند (Luka et al., 2017; Karakaş et al., 2012). بخش هوایی گالگا حاوی طیف وسیعی از متابولیت‌های ثانویه از جمله آلکالوئیدها، فلاونوئیدها، ساپونین‌ها و ترپنوئیدهاست که علاوه بر خواص درمانی، پتانسیل آنتی‌اکسیدانی قابل توجهی نیز دارند (Jung et al., 2006; Karakaş et al., 2016).

اگرچه خواص دارویی گالگا به خوبی شناخته شده است، اما پژوهش های محدودی در مورد پاسخ این گیاه به تنش‌های محیطی به‌ویژه شوری انجام شده است. تنش شوری توسط دو سازوکار اصلی استرس اسمزی و سمّیت یونی، به گیاه آسیب می‌رساند. تجمع یون‌های سمی مانند سدیم (Na^+) و کلر (Cl^-) در خاک، پتانسیل آب خاک را کاهش داده و جذب آب توسط ریشه را با مشکل مواجه می‌سازد. از سوی دیگر، ورود این یون‌ها به درون گیاه، تعادل یونی سلول را بر هم زده و با اختلال در جذب عناصر غذایی ضروری مانند پتاسیم (K^+) و کلسیم (Ca^{+2})، فعالیت آنزیم‌ها، فتوسنتز و تقسیم سلولی را مختل می‌کند (Van Zelm et al., 2020). در پاسخ به این شرایط، گیاهان سازوکارهای متعددی از جمله تجمع اسمولیت‌های سازگار مانند پرولین برای تنظیم فشار اسمزی، افزایش فعالیت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی برای خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و تنظیم انتقال یون‌ها را استفاده می‌کنند (Arteaga et al., 2020).

از سوی دیگر، رنگیزه‌های فتوسنتزی به عنوان شاخص‌های حساس به تنش شوری شناخته می‌شوند که کاهش آن‌ها نشان‌دهنده آسیب به دستگاه فتوسنتز است (Bistgani et al., 2019). پژوهش‌های متعدد بر روی گیاهان دارویی مختلف نشان داده است که تنش شوری منجر به کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و در عین حال افزایش متابولیت‌های ثانویه و ترکیبات دفاعی می‌شود. به عنوان مثال، در گیاه نعناع فلفلی، تنش شوری منجر به کاهش جذب پتاسیم و کلسیم، افزایش جذب سدیم و تجزیه کلروفیل و کاروتنوئیدها شد (Jahanbakhsh Godehkahriz et al., 2017). همچنین در گیاه جعفری مکزیکی، تنش شوری سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ و مقدار کلروفیل a و b شد، امّا مقدار نشت الکترولیت، فعالیت آنتی اکسیدانی، فنل کل، قندهای محلول و پرولین را افزایش داد (Azizi et al., 2021). در پژوهش‌دیگری تنش شوری منجر به کاهش عملکرد گل، کلروفیل کل، کارتنوئید و محتوی نسبی آب برگ گیاه دارویی همیشه بهار شد (Veisi et al., 2023). همچنین در

پژوهش دیگری نشان دادند تنش شوری تأثیر منفی قابل توجهی بر رشد و شاخص‌های بیوشیمیایی گیاه کینوا دارد، به طوری که با افزایش سطح شوری، شاخص‌های رشدی مانند ارتفاع و وزن بوته و خوشه و همچنین طول و وزن تر ریشه کاهش یافت. همچنین، شوری سبب کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش شاخص‌های تنش اکسیداتی و مانند پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدئید شد (Narouizad & Karamian, 2025).

به عبارت دیگر، انتخاب محیط و روش کشت مناسب می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در تعدیل اثرات منفی تنش‌های محیطی داشته باشد. به عنوان مثال، کشت گلخانه‌ای با کنترل عوامل اقلیمی، امکان مدیریت بهینه آبیاری و تغذیه را فراهم می‌آورد (Eslami, 2015)، از سوی دیگر، کشت مزرعه‌ای با در معرض قرار دادن گیاه به طیف وسیع‌تری از تنش‌ها، می‌تواند پاسخ‌های فیزیولوژیک متفاوتی را ایجاد کند (Ramos-López et al., 2020). پژوهش‌های مقایسه‌ای نشان داده‌اند که عملکرد و اجزای عملکرد در شرایط گلخانه اغلب بالاتر از کشت مزرعه‌ای است. به عنوان مثال، در گیاه سیر، عملکرد و اجزای عملکرد در شرایط گلخانه نسبت به فضای باز به طور معنی‌داری افزایش یافت (Turfan, 2022).

با وجود پژوهش‌های متعدد در مورد تأثیر شوری بر گیاهان دارویی و اهمیت روش‌های مختلف کشت، اطلاعات کاملی در مورد پاسخ گیاه گالگا به تنش شوری در محیط‌های کشت مختلف در دسترس نیست. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد دانه گیاه گالگا تحت تأثیر سطوح مختلف تنش شوری در سه محیط کشت گلخانه، گلدان هوای آزاد و مزرعه طراحی و انجام شد. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای ارائه راهکارهای عملی کشت این گیاه دارویی ارزشمند در شرایط مختلف محیطی و مدیریتی فراهم نماید.

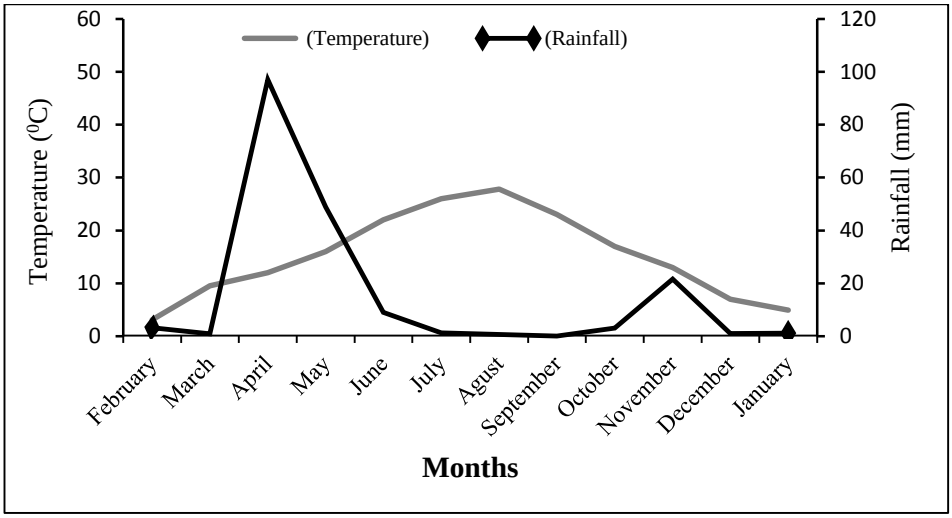
مواد و روش‌ها

مکان و زمان اجرای تحقیق

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه واقع در عرض جغرافیایی ′۳۲ °۳۷ و طول جغرافیایی ′۵ °۴۵ و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا اجرا شد. منطقه دارای اقلیم معتدل سرد با زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک است. مشخصات دما و بارندگی (منحنی آمبرترمیک) منطقه مورد آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.

طرح آزمایشی و تیمارها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل سه سطح شوری (۰/۱، ۵ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) و فاکتور دوم شامل سه محیط کشت (گلخانه، گلدان هوای آزاد و مزرعه) بود (شکل ۲).



شکل ۱- منحنی آمبروترمیک منطقه در طول مراحل رشد گیاه در مزرعه

Figure 1- Ambrothermic curve of region during the stages of plant growth in the field

شکل ۲- کاشت گیاه گالگا در سه محیط کشت مختلف، گلخانه، گلدانی در هوای آزاد و تشتک در مزرعه

Figure 2- Planting *Galega* in three different growing environments: greenhouse, outdoor pot, and field pot

اجرای آزمایش

کشت مزرعه‌ای: بذرها در تشتک‌هایی به ابعاد ۱×۰/۳۵×۰/۴ متر (طول×عرض×ارتفاع) با فاصله‌گذاری مناسب کشت شدند.

کشت گلدانی: از گلدان‌هایی با قطر ۵۰ و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد.

آبیاری: تا مرحله استقرار کامل گیاهان (۴-۲ برگی) همه تیمارها با آب معمولی آبیاری شدند و سپس تیمارهای شوری به صورت پلکانی اعمال شد.

کنترل شوری: EC زهآب به طور منظم اندازه‌گیری و در صورت نیاز با شستشو با آب معمولی تنظیم شد.

عملیات کاشت در تاریخ ۱۵ اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۲ انجام شد. اولین آبیاری ۱۶ اردیبهشت ماه و اعمال تنش شوری برای هر سه محیط کشت در ۳۱ خرداد ماه انجام گرفت. در کشت‌های گلدانی (گلدان در گلخانه، گلدان در هوای آزاد)، آماده‌سازی گلدان‌ها در فروردین ماه انجام شد. همچنین ارتفاع و قطر هر گلدان به ترتیب، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر بود. از خاک مزرعه دانشکده کشاورزی جهت پر کردن گلدان‌ها استفاده شد. علاوه بر این، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک گلدان‌ها در آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشگاه ارومیه مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۱). تاریخ برداشت گلدان‌های هوای آزاد و مزرعه در ۷ مهرماه و گلخانه در تاریخ ۷ آبان ماه انجام شد.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش قبل از کاشت

Table 2- Some physicochemical properties of the soil at the test site before planting

K (mg/kg)	P (mg/kg)	OC (%)	$CaCo_3$ (%)	pH	EC (ds/m)	PWP (%)	FC (%)	Bulk density (g/cm^3)	sand (%)	silt (%)	clay (%)	Soil texture
385	13.20	1.45	5.64	7.84	0.59	13	27	1.35	33.5	27.5	39	Loamy clay

جهت کاهش اثر حاشیه‌ای تشتک‌ها با فاصله ۲ متر از هر طرف، در مزرعه مستقر شدند. با حفر چاله، کلیه تشتک‌ها تا سطح رویی، در داخل خاک قرار گرفتند و برای هر تشتک به صورت جداگانه شیر تخلیه زه آب تعبیه شد. همچنین خاک مزرعه تا عمق ۳۰ سانتی‌متر، در داخل آنها افزوده شد. در موقع کاشت در هر چاله، ۳ عدد بذر با فاصله ردیف ۲۰ سانتی‌متر و فاصله بوته روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر، قرار داده شد که در مرحله ۲-۴ برگی بوته‌های اضافی تنک شدند. از سوی دیگر، تنش شوری بعد از استقرار گیاه و از مرحله ۲-۴ برگی اعمال شد. برای تعیین زمان و حجم آبیاری از رابطه ۱ استفاده شد (Alizadeh, 2010).

رابطه (۱):

$$RAW = \frac{FC-PWP}{100} \times \rho \times D \times MAD$$

که در آن RAW، آب به راحتی قابل دسترس (میلی‌متر)، F، ظرفیت زراعی، PWP، نقطه پژمردگی دایم، ρ ، وزن مخصوص ظاهری، D ، عمق توسعه ریشه بر حسب میلی‌متر و MAD، ضریب آب قابل دسترس راحت است. در خاک رسی لومی ظرفیت زراعی خاک ۲۷ و نقطه پژمردگی دائم ۱۳ است. همچنین وزن مخصوص ظاهری خاک ۱/۳۵ است. عمق توسعه ریشه در گالگا ۴۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ضریب آب قابل دسترس راحت یا F یا MAD یا θ است و ۰/۴ در نظر گرفته شد. میزان تبخیر و تعرق روزانه از ایستگاه هواشناسی دانشگاه گرفته شد و بر اساس آن دور آبیاری محاسبه شد. میزان آب آبیاری با آب پاش و با حجم مشخص به هر گلدان داده شد. دور آبیاری بر اساس میزان تبخیر و تعرق تنظیم شد که حدوداً ۵ روز بود. تیمار شوری به صورت پلکانی اعمال شد، برای این منظور در ابتدا و برای سازگار شدن، گیاهان با شوری کمتر آبیاری شدند و سپس شوری‌های ذکر شده بر اساس تیمارها اعمال شدند. البته هر ۱۰ روز یکبار محیط ریشه گیاهان با آب معمولی به‌طور کامل شستشو داده شد تا تغییرات pH و EC ناشی از تجمع نمک‌ها در بستر کاشت به حداقل برسد. همچنین در پایان آزمایش میزان شوری تجمعی در خاک گلدان‌ها اندازه‌گیری شد که EC آب خروجی یا زهکش گلدان‌ها تقریبا با تیمارهای سطوح شوری آزمایش مشابه بود (جدول ۲).

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش بعد از برداشت

Table 2- Some physicochemical properties of the soil at the test site after harvesting

Outdoor pot			Field			Greenhouse			
10	5	0.1	10	5	0.1	10	5	0.1	Salinity
1.06	0.74	0.41	0.97	0.75	0.40	1.25	0.64	0.39	Na (Meq L^{-1})
63.2	35.6	10.4	49.8	32.2	4	56.6	21.2	5.4	Cl (Meq L^{-1})
10.48	6.21	2.34	9.21	4.95	0.66	9.51	6.82	2.54	EC (dS m^{-1})
8.21	7.99	6.94	7.81	7.88	7.91	7.92	8.21	8.09	pH

اندازه‌گیری صفات

صفات بیوشیمیایی: محتوای کلروفیل a و b با روش Arnon (1949)، کاروتنوئیدها با روش Lichtenthaler (1987)، پرولین با روش Bates et al. (1973)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی با روش DPPH (2,2- diphenyl-1-picrylhydrazyl) (Brand-Williams et al., 1995) و درصد خاکستر با روش Seyed Sharifi & Gholinezhad (2022) اندازه‌گیری شد.

عناصر معدنی: میزان سدیم و پتاسیم توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

صفات فیزیولوژیکی: نشت الکترولیت با روش Bai et al. (1996)، محتوای نسبی آب برگ با روش Wikenz & Norfolk, (2010)، شاخص کلروفیل با روش (با کلروفیل متر دستی، مدل MINOLTA-502 کشور ژاپن) و دمای داخلی برگ (با دماسنج مادون قرمز) اندازه‌گیری شد.

عملکرد دانه: پس از رسیدگی کامل، دانه‌ها در آون در ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک و توزین شدند.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS نسخه ۹,۱ انجام و مقایسه میانگین‌ها با آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج

پاسخ فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گالگا به شوری در محیط کنترل‌شده گلخانه

نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در شرایط گلخانه نشان داد اثرات تنش شوری بر کلروفیل b، محتوای کاروتنوئید، درصد خاکستر، محتوای پرولین، درصد سدیم و پتاسیم معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین نشان داد تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری محتوای کاروتنوئید را به‌میزان (۴۵ و ۳۸٪) در شرایط گلخانه کاهش داد (جدول ۴). بیشترین میزان کلروفیل b و درصد پتاسیم در شرایط بدون تنش شوری بدست آمد، امّا با افزایش شدت تنش شوری تا ۱۰ دسی-زیمنس بر متر، میزان کلروفیل b و درصد پتاسیم به‌ترتیب به‌میزان ۵۶ و ۱۰٪ کاهش معنی‌داری پیدا کرد (جدول ۴). بیشترین درصد خاکستر (۸/۱۰ ٪) در شرایط تنش شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد. تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری محتوای پرولین و درصد سدیم را به‌ترتیب به‌میزان (۸۵ و ۵۵ ٪) و (۵۵ و ۴۴ ٪) در شرایط گلخانه افزایش داد (جدول ۴). بر اساس نتایج این پژوهش، در شرایط کشت گیاه گالگا در داخل گلخانه، گیاه به مرحله زایشی (گلدهی کامل) رسید، امّا با توجه به دمای ثابت و رطوبت گلخانه عمل تلقیح به‌خوبی انجام نشد و به مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی نرسید. به عبارت دیگر، فقط در تنش شوری ۱۰ دسی زیمنس بر متر چند گیاه در هرگیاه نهایت یک یا دو نیام به‌صورت ناقص بذر داشتند.

جدول ۳- تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در شرایط گلخانه

Table 3- Effect of different levels of salinity stress on physiological and biochemical traits under greenhouse conditions

S.O.V	df	Antioxidant activity	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Proline	Ash	Carotenoids
Block	2	35.02 ^{ns}	5.12 ^{ns}	0.108 ^{ns}	754.33 ^{ns}	1.35 *	216.01 ^{ns}
Salinity stress	2	130.71 ^{ns}	1.49 ^{ns}	2.55 **	3621561.33 **	0.90 *	1120.89 *
Experimental error	4	132.37	1.06	0.079	757.66	0.15	167.73
C.V (%)	-	20.56	23.39	12.33	2.25	5.10	22.50

**، * و ns به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، ۵٪ و غیر معنی‌دار.

**, * and ns: significant at 1%, 5% and non-significant probability levels, respectively.

ادامه جدول ۳

Continuous Table 3

S.O.V	df	Na	K	Electrolyte leakage	Chlorophyll index	Internal leaf temperature	Relative water content
Block	2	39900.77 ns	13564668.11 ns	8.30 ns	62.75 ns	0.089 ns	0.43 ns
Salinity stress	2	1018640.11 **	1624184.11 *	33.19 ns	17.33 ns	1.12 ns	46.20 ns
Experimental error	4	55935.11	377633.94	6.92	12.50	0.62	9.83
C.V (%)	-	15.02	11.50	2.87	10.00	3.60	3.48

**، * و ns به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، ۵٪ و غیر معنی‌دار.

**, * and ns: significant at 1%, 5% and non-significant probability levels, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در شرایط گلخانه

Table 4- Mean comparison of different levels of salinity stress on physiological and biochemical traits under greenhouse conditions

Treatment Salinity stress (ds/m)	Chlorophyll b (mg/L)	Carotenoids (mg/kg)	Ash (%)	Proline (ppm)	Na (mg/kg)	K (mg/kg)
0.1	2.79 a	79.57 a	7.06 a	36.8 c	94.5 b	519.9 a
5	2.83 a	49.63 a	7.91 a	82.00 b	168.2 a	614.0 a
10	1.21 b	43.42 a	8.10 a	245.9 a	209.5 a	469.0 a

میانگین‌هایی که در هر ستون حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون توکی در سطح ۵ درصد است.

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability levels using Tukey test.

تأثیر متقابل شوری و محدودیت ریشه بر عملکرد و صفات فیزیولوژیک در گلدان‌های هوای آزاد

نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در شرایط گلدان‌های هوای آزاد را نشان دادند. تأثیر تنش شوری بر کلروفیل a، کلروفیل b، محتوای کاروتنوئید، محتوای پرولین، درصد سدیم و پتاسیم، نشت الکترولیت و محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین نشان داد تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، درصد پتاسیم و محتوای نسبی آب برگ را به‌ترتیب به‌میزان (۳۲ و ۹٪)، (۲۴ و ۱۷٪)، (۶۰ و ۱۰٪) و (۲۱ و ۱۴٪) در شرایط گلدان-های هوای آزاد کاهش داد (جدول ۶). تنش شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد، محتوای کاروتنوئید را ۱۵ درصد افزایش داد، امّا با افزایش تنش شوری تا ۱۰ دسی زیمنس بر متر محتوای کاروتنوئید به‌میزان ۱۹ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری افزایش یافت (جدول ۶). تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری محتوای پرولین و درصد سدیم را به‌ترتیب به‌میزان (۷۹ و ۶۲ درصد) و (۸۰ و ۶۹ درصد) در شرایط گلدان‌های هوای آزاد افزایش داد (جدول ۶). نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر عملکرد دانه در شرایط گلدان‌های هوای آزاد نشان داد. به عبارت دیگر، تأثیر تنش شوری بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین نشان داد تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی-زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری، عملکرد دانه را به میزان (۲۹ و ۴ ٪) در شرایط گلدان‌های هوای آزاد کاهش داد (جدول ۶).

جدول ۵- تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در شرایط گلدان‌های هوای آزاد

Table 5- Effect of different levels of salinity stress on physiological and biochemical traits under outdoor pots conditions

S.O.V	df	Antioxidant activity	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Proline	Ash	Carotenoids
Block	2	29.85 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.028 *	22537.00 **	0.17 ^{ns}	27.47 ^{ns}
Salinity stress	2	7.48 ^{ns}	1.90 **	0.40 **	3268566.33 **	0.50 ^{ns}	543.14 **
Experimental error	4	34.23	0.097	0.0036	359.33	0.64	37.91
C.V (%)	-	8.62	7.60	2.44	1.24	8.21	8.38

**، * و ns به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ، ۵٪ و غیر معنی‌دار.

**, * and ns: significant at 1%, 5% and non-significant probability levels, respectively.

ادامه جدول ۵

Continuous Table 5

S.O.V	df	Na	K	Electrolyte leakage	Chlorophyll index	Internal leaf temperature	Relative water content	Grain yield
Block	2	253156.00 ^{ns}	5885534.78 ^{ns}	0.16 ^{ns}	131.00 ^{ns}	4.61 ^{ns}	38.13 ^{ns}	0.046 **
Salinity stress	2	26245429.00 **	10589771.44 *	16.48 *	298.59 ^{ns}	0.99 ^{ns}	312.29 *	0.27 **
Experimental error	4	296246.5	1504425.44	1.52	161.64	5.48	39.85	0.0037
C.V (%)	-	12.07	16.39	1.30	22.95	7.74	7.58	2.87

**، * و ns به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ، ۵٪ و غیر معنی‌دار.

**, * and ns: significant at 1%, 5% and non-significant probability levels, respectively.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در شرایط گلدان‌های هوای آزاد

Table 6- Mean comparison of different levels of salinity stress on physiological and biochemical traits under outdoor pots conditions

Treatment Salinity stress (ds/m)	Chlorophyll a (mg/L)	Chlorophyll b (mg/L)	Carotenoids (mg/kg)	Proline (ppm)	Na (mg/kg)	K (mg/kg)	Electrolyte leakage (%)	Relative water content (%)	Grain yield (g/plant)
0.1	4.76 a	2.88 a	73.77 ab	53.60 c	146 c	897 a	91.86 b	94.39 a	2.35 a
5	4.32 a	2.40 b	86.67 a	141.00 b	468 b	810 ab	94.11 ab	81.06 ab	2.26 a
10	3.22 b	2.16 c	59.77 b	261.6 a	737 a	537 b	96.54 a	74.35 b	1.79 b

میانگین‌هایی که در هر ستون حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون توکی در سطح ۵ درصد است.

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability levels using Tukey test.

الگوی پاسخ صفات فیزیولوژیک و عملکرد گالگا به تنش شوری در سیستم کشت مزرعه‌ای

نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در شرایط مزرعه نشان داد. تأثیر تنش شوری بر کلروفیل a، محتوای کاروتنوئید، محتوای پرولین، درصد سدیم و پتاسیم، نشت الکترولیت، شاخص کلروفیل، دمای داخلی برگ و محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین نشان داد تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری محتوای کلروفیل a، درصد پتاسیم و محتوای نسبی آب برگ را به‌ترتیب به‌میزان (۳۵ و ۸٪)، (۴۸ و ۲۰٪) و (۲۱ و ۱۴٪) در شرایط مزرعه کاهش داد (جدول ۸). تنش شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد، شاخص کلروفیل را به‌میزان ۹ درصد کاهش داد. تنش شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شاهد، محتوای کاروتنوئید را ۱۲ درصد افزایش داد، امّا با افزایش تنش شوری تا ۱۰ دسی زیمنس بر متر محتوای کاروتنوئید به‌میزان ۴۵ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری افزایش یافت (جدول

۸). تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری محتوای پرولین، درصد سدیم، نشت الکترولیت و دمای داخلی برگ را به‌ترتیب به‌میزان (۶۸ و ۵۹٪)، (۸۳ و ۵۶٪)، (۶ و ۶٪) و (۲۳ و ۹٪) در شرایط مزرعه افزایش داد (جدول ۸). نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر عملکرد دانه در شرایط مزرعه نشان داد. به عبارت دیگر، تأثیر تنش شوری بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین نشان داد تنش شوری ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری، عملکرد دانه در شرایط مزرعه را به‌ترتیب به‌میزان (۷۸ و ۶۷٪) کاهش داد (جدول ۸). به طور متوسط، کشت مزرعه‌ای گالگا بالاترین عملکرد دانه (۲/۹۸ گرم در هر بوته) و کشت گلدانی هوای آزاد (۲/۱۳ گرم در هر بوته) پائین‌ترین عملکرد دانه را تولید کرد.

جدول ۷- تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در شرایط مزرعه

Table 7- Effect of different levels of salinity stress on physiological and biochemical traits under field conditions

S.O.V	df	Antioxidant activity	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Proline	Ash	Carotenoids
Block	2	3.33 ^{ns}	0.55 ^{ns}	0.17 ^{ns}	5098.77 **	1.35 ^{ns}	42.90 ^{ns}
Salinity stress	2	6.79 ^{ns}	1.49 **	0.68 ^{ns}	492203.44 **	0.8 ^{ns}	1248.93 **
Experimental error	4	19.60	0.11	0.14	213.11	0.93	16.53
C.V (%)	-	5.07	10.00	18.20	1.78	9.97	6.88

**، * و ns به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، ۵٪ و غیر معنی‌دار.

**, * and ns: significant at 1%, 5% and non-significant probability levels, respectively.

ادامه جدول ۷

Continuous Table 7

S.O.V	df	Na	K	Electrolyte leakage	Chlorophyll index	Internal leaf temperature	Relative water content	Grain yield
Block	2	22710.33 ^{ns}	133095.44 ^{ns}	0.24 ^{ns}	17.37 ^{ns}	1.51 ^{ns}	4.78 ^{ns}	0.035 **
Salinity stress	2	16617785.33 **	22667358.78 **	34.57 **	140.88 *	46.40 **	175.32 **	18.27 **
Experimental error	4	72096.17	359845.44	2.65	14.58	0.74	9.53	0.07
C.V (%)	-	9.67	6.83	1.71	6.18	3.04	3.48	9.40

**، * و ns به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، ۵٪ و غیر معنی‌دار.

**, * and ns: significant at 1%, 5% and non-significant probability levels, respectively.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثرات تنش شوری بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در شرایط مزرعه

Table 8- Mean comparison of different levels of salinity stress on physiological and biochemical traits under field conditions

Treatment Salinity stress (ds/m)	Chlorophyll a (mg/L)	Carotenoids (mg/kg)	Proline (ppm)	Na (mg/kg)	K (mg/kg)	Electrolyte leakage (%)	Chlorophyll index (%)	Internal leaf temperature (^{0}C)	Relative water content (%)	Grain yield (g/plant)
0.1	3.88 a	66.16 a	37.2 c	89.10 c	1136 a	91.39 b	60.93 ab	25.05 b	95.57 a	5.81 a
5	3.56 a	74.99 a	91.7 b	202.00 b	906 b	97.13 a	68.96 a	27.56 b	90.06 a	1.89 b
10	2.53 b	36.07 b	116.4 a	541.40 a	589.7 c	97.40 a	55.33 b	32.76 a	80.47 b	1.25 b

میانگین‌هایی که در هر ستون حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون توکی در سطح ۵ درصد می‌باشند.

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability levels using Tukey test.

بحث

پژوهش حاضر، تحلیل کاملی از پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه گالگا به تنش شوری در سه محیط کشت مختلف (گلخانه، گلدان هوای آزاد و مزرعه) ارائه می‌دهد. یافته‌های ما نشان دادند تنش شوری به‌طور معنی‌داری رشد گیاه و عملکرد دانه را مختل کرد، از سوی دیگر، همزمان مجموعه‌ای از سازوکارهای سازگاری فیزیولوژیک و بیوشیمیایی را القاء نمود. شدت این پاسخ‌ها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر محیط کشت قرار داشت. یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش، اثر معنی‌دار محیط کشت بر عملکرد و تحمل به شوری گیاه گالگا است. کشت مزرعه‌ای در شرایط بدون شوری بر بیشترین عملکرد دانه (۲/۹۸ گرم در بوته) را تولید کرد که پس از آن به ترتیب کشت گلخانه‌ای و گلدان‌های هوای آزاد قرار گرفتند. این برتری احتمالاً به علّت توسعه آزادانه‌تر ریشه، دسترسی بیشتر به مواد مغذی و شرایط نوری مطلوب‌تر در مزرعه است (Ramos-López et al., 2020). علاوه بر این، کمترین عملکرد در گلدان‌های هوای آزاد (۲/۱۳ گرم در بوته) را می‌توان به محدودیت حجم ریشه،که سبب محدود شدن جذب آب و مواد مغذی و تشدید نوسانات دما می‌شود، نسبت داد (Turfan, 2022). در محیط گلخانه، علی‌رغم کنترل دما و رطوبت، عدم دستیابی به بلوغ فیزیولوژیک کامل و تولید بذر باکیفیت، حتی در شرایط شاهد، نشان‌دهنده محدودیت‌های احتمالی در کارایی گرده‌افشانی، احتمالاً به علّت عدم وجود باد یا حشرات گرده‌افشان، یا رطوبت غیربهینه برای قابلیت حیات دانه گرده است (Yari et al., 2025).

با توجه به یافته‌ها، محیط کشت به‌طور چشمگیری پاسخ گیاه به تنش نمک را تعدیل کرد. شدیدترین کاهش عملکرد تحت تنش شوری در محیط مزرعه (۷۸٪ و ۶۷٪ کاهش به ترتیب در سطوح ۱۰ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر) مشاهده شد. از سوی دیگر، این امر را می‌توان به اثرات ترکیبی شوری با سایر عوامل تنش‌زای مزرعه از جمله شدت نور بالاتر، تقاضای تبخیر و تعرق بیشتر و نوسانات دمایی نسبت داد که یک سناریوی چندتنشی را ایجاد می‌کند (Del Carmen Orozco-Mosqueda et al., 2020). در مقابل، گیاهان در گلدان‌های هوای آزاد کاهش عملکرد نسبتاً کمتری نشان دادند (۲۹٪ و ۴٪)، که نشان دهنده این است که محدودیت ریشه ممکن است گیاهان را از قبل با سطح معینی از تنش سازگار کرده باشد، یا آبیاری کنترل‌شده در گلدان‌ها از تنش ثانویه خشکی که اغلب با شوری در مزرعه همراه است، جلوگیری کرده است. محیط گلخانه، اگرچه در برابر شرایط حدی آب و هوایی محافظت ایجاد می‌کرد، برای موفقیت زایشی تحت تنش شوری مناسب نبود که این موضوع نشان می‌دهد سازوکارهای تحمّل به تنش می‌توانند مرحله-خاص (رویشی در مقابل زایشی) باشند. تنش شوری به‌طور مداوم محتوای کلروفیل a و b را در تمامی محیط‌ها کاهش داد که شدیدترین اثر در محیط مزرعه و در سطح شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد. این کاهش یک پدیده به‌خوبی مستند تحت تنش نمک است و می‌توان آن را به چندین سازوکار درهم‌تنیده نسبت داد: (۱) بی‌ثباتی کمپلکس‌های پروتئین-رنگدانه و تجزیه افزایش‌یافته کلروفیل توسط آنزیم کلروفیلاز (Bistgani et al., 2019)؛ (۲) مهار آنزیم‌های کلیدی در مسیر بیوسنتز کلروفیل، مانند آمینولوولینیک اسید سنتاز (Santos, 2004) و (۳) آسیب اکسیداتیو به غشاهای کلروپلاست و رنگدانه‌ها توسط سطوح افزایش‌یافته گونه‌های فعال اکسیژن (Heidari, 2012). کاهش کلروفیل به‌طور مستقیم با کاهش ظرفیت فتوسنتزی مشاهده شده و در نهایت، کاهش عملکرد دانه مرتبط است. بر اساس سایر یافته ها گزارش شده است که در گیاه کاهو تنش شوری ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مولار سبب کاهش ۶۴ درصدی کلروفیل کل و ۴۰ درصدی کاروتنوئید در مقایسه با عدم تنش شوری شد (Zuzunaga-Rosas et al., 2024). در آزمایش‌های ما، غلظت کلروفیل و کاروتنوئید کل نیز با افزایش شوری

خارجی کاهش یافت، به عبارت دیگر، نتایج مبین این واقعیت شناخته شده هستند که تنش نمک بر فعالیت فتوسنتزی تأثیر منفی می‌گذارد و بیوسنتز کلروفیل را محدود می‌کند و غلظت سایر اجزا را کاهش می‌دهد (Rizwan et al., 2015).

کلروفیل یکی از اجزای مهم سیستم فتوسنتزی است که مقدار آن به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم فیزیولوژیک تحمل به تنش شوری در گیاهان ارزیابی می‌شود. در این پژوهش با افزایش سطح شوری، مقادیر رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a،b ، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها) کاهش یافت. کاهش میزان کلروفیل در اثر تنش شوری توسط(Lamian et al., 2015) در ترخون، (Bistgani et al., 2019) در آویشن باغی، دنایی (Farsaraei et al., 2020) در ریحان، (Esmaielpour et al., 2020) در بادرشبو و (Azimzadeh et al., 2021) در مرزنجوش نیز گزارش شده است که نتایج این پژوهش را مورد تأئید قرار دادند. کاهش میزان کلروفیل بر اثر تنش شوری می‌تواند به علّت تحریک فعالیت آنزیم کلروفیلاز (Bistgani et al., 2019)، کاهش فعالیت آنزیم آمینولوولینیک اسید سنتاز (یکی از آنزیم‌های مهم در مسیر بیوسنتزی کلروفیل) (Santos, 2004) اکسیداسیون و تجزیه آنها به علّت افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (Heidari, 2012) و اختلال در جذب عناصر شرکت کننده در ساختار کلروفیل (مانند آهن و منیزیم) (Munns, 2002) باشد.

جالب توجه است که محتوای کاروتنوئیدها پاسخ پیچیده‌تر و وابسته به محیطی را نشان داد. در شوری متوسط (۵ دسی‌زیمنس بر متر)، کاروتنوئیدها در هر دو محیط گلدان هوای آزاد (۱۵٪) و مزرعه (۱۲٪) افزایش یافتند. این افزایش یک سازوکار سازگاری حیاتی است، زیرا کاروتنوئیدها هم به عنوان رنگدانه‌های فرعی و هم به عنوان آنتی‌اکسیدان‌های قوی غیرآنزیمی عمل کرده که گونه‌های فعال اکسیژن را خنثی کرده و دستگاه فتوسنتزی را در برابر آسیب نوری- اکسیداتیو محافظت می‌کنند (Rizwan et al., 2015). با وجود این، در سطح شوری بالاتر (۱۰ دسی‌زیمنس بر متر)، این سازوکار محافظتی در مزرعه تحت الشعاع قرار گرفت و منجر به کاهش شدید کاروتنوئیدها شد که همزمان با بیشترین کاهش عملکرد همراه بود. در گلخانه، کاروتنوئیدها حتی در سطح ۵ دسی‌زیمنس بر متر نیز کاهش یافتند که نشان دادند شرایط خاص (مانند کیفیت نور، رطوبت) ممکن است این پاسخ جبرانی را مختل کرده باشد.

تجمع پرولین در پاسخ به شوری یک ویژگی ثابت در همه محیط‌ها بود که سطوح آن با تشدید تنش به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. پرولین به عنوان یک اسمولیت سازگار چندمنظوره عمل می‌کند که به حفظ تورژسانس سلول و جذب آب تحت تنش اسمزی کمک می‌کند (Alvarez et al., 2022). فراتر از نقش اسمزی آن، پرولین سبب تثبیت پروتئین‌ها و غشاءها شده و گونه‌های فعال اکسیژن را پاکسازی می‌کند و به عنوان چپرون مولکولی عمل می‌نماید و در نتیجه تحمل متقابل را اعطا می‌کند (Arteaga et al., 2020). افزایش قابل توجه محتوای پرولین، به‌ویژه در مزرعه در سطح ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، نشان‌دهنده فعال‌سازی قوی این مسیر دفاعی در تلاش برای مقابله با تنش شدید یونی و اسمزی است. در آزمایشی، محتوای پرولین برگ به طور قابل توجهی در پاسخ به افزایش غلظت NaCl در تیمارهای تنش افزایش یافت و به سطوح تقریباً ۹ برابر بیشتر در ۱۵۰ میلی مولار NaCl نسبت به شرایط غیر شور رسید (Zuzunaga-Rosas et al., 2024).

برای مقابله با عدم تعادل اسمزی، گیاهان مجموعه ای از سازوکار های تنظیم اسمزی را فعال می کنند و انواع مختلفی از املاح سازگار یا اسمولیت ها را در میان جمع می کنند که پرولین، گلیسین، بتائین و قندهای محلول مهمترین آنها هستند (Al-Yasi et al., 2020). پرولین در محصولات مختلف به عنوان نشانگر سطح تنش وارد شده توسط گیاهان گزارش شده است (Alvarez et al., 2022; Arteaga et

al., 2020). در آزمایش دیگری، همانطور که قبلاً برای گیاهان کاهو گزارش شده بود، غلظت پرولین به موازات غلظت NaCl افزایش یافت (Bulgari et al., 2019). با افزایش خشکی همچنین فعالیت آنتی اکسیدانتی، فنل کل، پرولین و نشت الکترولیت افزایش یافت و در مقابل از محتوای نسبی آب برگ، رنگیزه‌های فتوسنتزی و پروتئین محلول کاسته شد (Arasteh et al., 2020). افزایش نشت الکترولیت تحت تنش شوری، شاخص مستقیمی از آسیب غشاء و از دست دادن یکپارچگی آن است که اغلب نتیجه تنش اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن است (Parihar et al., 2015). افزایش مشاهده‌شده در نشت الکترولیت در بین محیط‌ها تأئید می‌کند که شوری پراکسیداسیون غشاء را القا کرده است. فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه، که در اینجا توسط آزمون DPPH و افزایش اولیه کاروتنوئیدها استنباط شد، یک استراتژی دفاعی برای کاهش این آسیب است. تجمع ترکیبات فنلی، همان‌طور که در نتیجه‌گیری ما پیشنهاد شد، جزء کلیدی دیگری از این دفاع آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی است که به خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن و محافظت از ساختارهای سلولی کمک می‌کند (Azizi et al., 2021).

شوری تعادل یونی را با ترویج تجمع یون‌های سمی Na^+ و به خطر انداختن جذب یون‌های ضروری K^+ مختل می‌کند. داده‌های ما به وضوح افزایش شدید Na^+ برگ و کاهش همزمان K^+ را با افزایش شوری نشان دادند. سدیم برای جذب توسط کانال‌های انتقالی مشترک با K^+ رقابت می‌کند و می‌تواند فرآیندهای آنزیمی وابسته به K^+ را مهار کند (Parihar et al., 2015). نقش حیاتی K^+ در فعال‌سازی آنزیم‌ها، تنظیم روزنه‌ای و تنظیم اسمزی، حفظ آن را برای بقای گیاه تحت تنش حیاتی می‌سازد (Wang et al., 2013). محتوای بالاتر K^+ و نسبت پائین‌تر Na^+/K^+ در گلدان‌های هوای آزاد تحت تنش ۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با مزرعه در همان سطح تنش، ممکن است تا حدی حفظ عملکرد بهتر در گلدان‌ها را توضیح دهد که نشان‌دهنده یک سازوکار کارآمدتر حفظ K^+ یا ورود کمتر Na^+در گیاهان کشت‌شده در گلدان است. تنش شوری همچنین می‌تواند تعادل تغذیه‌ای را تغییر دهد، زیرا اثرات متضاد بر جذب و انتقال مواد مغذی در گیاه ایجاد می‌کند (Parihar et al., 2015). شوری سبب ایجاد سمیت Na^+ می‌شود، زیرا با کاتیون‌های مختلف مانند Ca^{+2} برای مکان‌های اتصال در دیواره سلولی ریشه رقابت می‌کند (Hoffmann et al., 2020) و از فعالیت ناقل‌های یون خاص واقع در غشای پلاسمایی جلوگیری می‌کند (Lu et al., 2016). علاوه بر این، غلظت بالای Na^+ درون سلولی بیان چندین ژن و فعالیت آنزیم‌های ضروری را تغییر می‌دهد و منجر به کمبود متابولیک می‌شود (Petretto et al., 2019). در پژوهشی، غلظت Na^+ و Cl^- با افزایش شوری در ریشه و برگ گیاه کاهو به طور معنی‌داری افزایش یافت، در حالی که غلظت Ca^{2+} کاهش یافت. با این وجود، محتویات پتاسیم به موازات افزایش سطح شوری افزایش یافت و در برگ‌ها حدود ۵ برابر بیشتر از ریشه بود، که نشان دهنده انتقال فعال K^+ به قسمت هوایی است. Carillo در پژوهشی بر روی دو نوع کاهو که در معرض غلظت‌های مختلف نمک قرار گرفتند، پاسخ‌های مشابهی یافتند که افزایش K^+ برگی را در یکی از واریته‌ها گزارش کردند (Carillo et al., 2020). انتقال فعال پتاسیم از ریشه به برگ به عنوان یک سازوکار دفاعی مرتبط در کاهو ظاهر می‌شود که در پاسخ به شرایط تنش شوری فعال می‌شود (Wang et al., 2013). تنش شوری، رشد گیاه گالگا را به‌شکلی وابسته به غلظت، مهار کرد. این تنش موجب کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و افزایش غلظت یون سمی سدیم (Na^+) در ریشه و برگ شد. جالب توجه آن‌که، افزایش سدیم تا حدی با انتقال فعال پتاسیم (K^+) از ریشه به بخش‌های هوایی گیاه خنثی شد. از سوی دیگر، شوری سبب کاهش غلظت کلسیم (Ca^{2+}) در اندام‌های گیاهی شد. همچنین، تیمارهای شوری منجر به سنتز و تجمع پرولین در برگ‌ها

شد که نشان‌دهنده فعال‌سازی سازوکارهای تنظیم اسمزی و بروز تنش اکسیداتیو است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد تنش شوری عملکرد دانه گیاه گالگا را در هر سه شرایط کشت کاهش داد، امّا سبب افزایش ترکیبات فنلی شد. کشت مزرعه‌ای گیاه گالگا در مقایسه با کشت در داخل گلخانه و گلدانی هوای آزاد بیشترین عملکرد دانه و ترکیبات فنلی را تولید کرد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، کشت گیاه گالگا داخل گلخانه و گلدان‌های هوای آزاد، تحمل به شوری تا ۵ دسی‌زیمنس را دارد، امّا در شرایط مزرعه با افزایش شوری، عملکرد دانه کاهش معنی‌داری یافت. بنابراین در شرایط نرمال و بدون تنش شوری جهت حصول حداکثر عملکرد دانه کشت گیاه گالگا در شرایط مزرعه مناسب به‌نظر می‌رسد. از سوی دیگر، در شرایط آبیاری با آب شور ۵ دسی‌زیمنس بر متر، کشت گلدانی هوای آزاد حداکثر عملکرد دانه گیاه گالگا را تولید کرده و این روش کشت پیشنهاد می‌شود. همچنین اگر هدف از کشت گالگا استخراج ترکیبات موثره و فنلی باشد، روش کاشت مزرعه‌ای و اعمال تنش شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر قابل توصیه است. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود تنش شوری ۱۰ دسی زیمنس بر متر می‌تواند به عنوان القا کننده سنتز ترکیبات مهم صنعتی و دارویی در گیاهان گالگا مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه، داده‌های به‌دست‌آمده نشان دادند تنش شوری عملکرد گالگا را در هر سه محیط کشت به‌طور معنی‌داری کاهش داد، امّا از سوی دیگر، محتوای فنلی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان را بهبود بخشید.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت دانشگاه ارومیه و همکاران گرامی دانشکده کشاورزی در اجرا و اتمام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

Alizadeh, A. (2010). *The relationship between water, soil and plants*. Astan Qods Publications. [In Persian]

Al-Yasi, H., Attia, H., Alamer, K., Hassan, F., Ali, E., Elshazly, S., Hessini, K. (2020). Impact of drought on growth, photosynthesis, osmotic adjustment, and cell wall elasticity in Damask rose. *Plant Physiology and Biochemistry, 150*, 133-139. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.038

Alvarez, M. E., Savouré, A., & Szabados, L. (2022). Proline metabolism as regulatory hub. *Trends in Plant Science, 27*(1), 39-55. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.07.009

Arasteh, F., Moghaddam, M., & Ghasemi Pirbalouti, A. (2020). The effect of putrescine foliar application on the induction of drought resistance in Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.). *Cell and Tissue Journal, 11*(3), 204-220. https://doi.org/10.52547/JCT.11.3.204 [In Persian]

Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoloxidase in *Beta Vulgaris*. *Plant Physiology, 24*(1), 1-15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1

Arteaga, S., Yabor, L., Díez, M. J., Prohens, J., Boscaiu, M., & Vicente, O. (2020). The use of proline in screening for tolerance to drought and salinity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Agronomy, 10*(6), 817. https://doi.org/10.3390/agronomy10060817

Azimzadeh, Z., Hassani, A., Abdollahi Mandoulakani, B., & Sepehr, E. (2021). Effects of salinity stress on some morpho-physiological characteristics, essential oil content, and ion relations of two oregano subspecies (*Origanum vulgare* ssp.

vulgare & ssp. gracile). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 37*(4), 658-674. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.354240.2978 [In Persian]

Azizi, F., Moghaddam, M., Farsaraei, S., & Moshfegh, D. M. (2021). The effect of azomite application on reducing the damage of salinity stress in mexican marigold (*Tagetes minuta* L.). *Plant Productions, 44*(2), 247-258. https://doi.org/10.22055/ppd.2019.29933.1778 [In Persian]

Bai, B. Z., Yu, S. Q., Tian, W. X., & Zhao, J. Y. (1996). *Plant Physiology*: China Agricultural Science Press.

Bates, L. S., Waldren, R., Teare, I. J. P., & soil. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil, 39, 205-207.* http://doi.org/10.1007/BF00018060

Bistgani, Z. E., Hashemi, M., DaCosta, M., Craker, L., Maggi, F., & Morshedloo, M. R. (2019). Effect of salinity stress on the physiological characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of *Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* Celak. *Industrial Crops and Products, 135*, 311-320. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.055

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology, 28*(1), 25-30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

Bulgari, R., Trivellini, A., & Ferrante, A. (2019). Effects of two doses of organic extract-based biostimulant on greenhouse lettuce grown under increasing NaCl concentrations. *Frontiers in Plant Science, 9*, 1870. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01870

Carillo, P., Giordano, M., Raimondi, G., Napolitano, F., Di Stasio, E., Kyriacou, M. C., Rouphael, Y. (2020). Physiological and nutraceutical quality of green and red pigmented lettuce in response to NaCl concentration in two successive harvests. *Agronomy, 10*(9), 1358. https://doi.org/10.3390/agronomy10091358

Del Carmen Orozco-Mosqueda, M., Glick, B. R., & Santoyo, G. (2020). ACC deaminase in plant growth-promoting bacteria (PGPB): an efficient mechanism to counter salt stress in crops. *Microbiological Research, 235*, 126439. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126439

Eslami, M. R. (2015). Evaluation of marketing problems of greenhouse products in desert area (Case study: Greenhouse cucumber and tomato, Yazd province). *Journal of Arid Biome, 5*(1), 18-30. https://aridbiom.yazd.ac.ir/article_687.html [In Persian]

Esmaielpour, B., Shiekhalipour, M., & Torabi-Giglo, M. (2020). Effects of zinc nanoparticles on growth, some physiological characteristics, and essential oil yield of *Dracocephalum moldavica* L. under salinity stress conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 36*(5), 867-884. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2020.343320.2809 [In Persian]

Farsaraei, S., Moghaddam, M., & Pirbalouti, A. G. (2020). Changes in growth and essential oil composition of sweet basil in response of salinity stress and superabsorbents application. *Scientia Horticulturae, 271*, 109465. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109465

Heidari, M. (2012). Effects of salinity stress on growth, chlorophyll content and osmotic components of two basil (*Ocimum basilicum* L.) genotypes. *African Journal of Biotechnology, 11*(2), 379-384. https://doi.org/10.5897/AJB11.2572

Hoffmann, J., Berni, R., Hausman, J.-F., & Guerriero, G. (2020). A review on the beneficial role of silicon against salinity in non-accumulator crops: tomato as a model. *Biomolecules, 10*(9), 1284. https://doi.org/10.3390/biom10091284

Jahanbakhsh Godehkahriz, S., Khadem Sedighi, S., Ebadi, A., Tavakoli, N., & Davari, M. (2017). Effect of calcium on salt tolerance

protein expression and activity of antioxidants in borage under salinity condition. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*, *6*(1), 117-129. https://gebsj.ir/browse.php?a_id=196&sid=1&slc_lang=en

Jung, M., Park, M., Lee, H. C., Kang, Y. H., Kang, E. S., & Kim, S. K. (2006). Antidiabetic agents from medicinal plants. *Current Medicinal Chemistry*, *13*(10), 1203-1218. https://doi.org/10.2174/092986706776360860

Karakaş, F. P., Cingöz, G., & Türker, A. (2016). Enhancement of direct shoot regeneration and determination of bioactivesecondary metabolites in leaves of *Galega officinalis* L. *Turkish Journal of Biology*, *40*(6), 1311-1319. https://doi.org/10.3906/biy-1603-70

Karakaş, F. P., Yildirim, A., & Türker, A. (2012). Biological screening of various medicinal plant extracts for antibacterial and antitumor activities. *Turkish Journal of Biology*, *36*(6), 641-652. https://doi.org/10.3906/biy-1203-16

Lamian, A., Ladan Moghadam, A., & Mehrafarin, A. (2015). Changes of morpho-physiological traits, essential oil and methyl chavicol content of Tarragon (*Artemisia dracunculus*) to mycorrhiza (*Glomus intraradices*) inoculation and salinity stress. *Journal of Medicinal Plants*, *14*(56), 64-77. https://jmp.ir/article-1-1226-en.html [In Persian]

Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in Enzymology* (Vol. 148, pp. 350-382): Academic Press. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1

Lu, M., Zhang, Y., Tang, S., Pan, J., Yu, Y., Han, J., Sun, Q. (2016). AtCNGC$_2$ is involved in jasmonic acid-induced calcium mobilization. *Journal of Experimental Botany*, *67*(3), 809-819. https://doi.org/10.1093/jxb/erv500

Luka, C., Adoga, G., & Istifanus, G. (2017). Phytochemical studies of different fractions of *Galega officinalis* extract and their effects on some biochemical parameters in alloxan-induced diabetic rats. *European Journal of Medicinal Plants*, *19*(1), 1-10. https://doi.org/10.9734/EJMP/2017/32145

Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*, *25*(2), 239-250. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, *59*, 651–681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911

Narouizad, S., & Karamian, R. (2025). Impact of *Piriformospora indica* on morphophysiological parameters of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under salt stress. *Journal of Plant Biological Sciences*, *17*(63), 31-54. https://doi.org/10.22108/ijpb.2025.146299.1418 [In Persian]

Omidbeigi, R. (2011). *Production and processing of medicinal plants.* (Vol. 7. Astan Quds Razavi Publications. [In Persian]

Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2015). Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*, 4056-4075. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3739-1

Petretto, G. L., Urgeghe, P. P., Massa, D., & Melito, S. (2019). Effect of salinity (NaCl) on plant growth, nutrient content, and glucosinolate hydrolysis products trends in rocket genotypes. *Plant Physiology and Biochemistry*, *141*, 30-39. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.012

Ramos-López, B. I., Ortiz-Hernández, Y. D., Morales, I., & Aquino-Bolaños, T. (2020). Plant density on yield of Husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) in field and greenhouse. *Ciência Rural*, *51*, e20200992. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200992

Rizwan, M., Ali, S., Ibrahim, M., Farid, M., Adrees, M., Bharwana, S. A., Abbas, F.

(2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. *Environmental Science and Pollution Research, 22*, 15416-15431 https://doi.org/10.1007/s11356-015-5305-x

Santos, C. V. (2004). Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves. *Scientia Horticulturae, 103*(1), 93-99. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.04.009

Selmar, D., & Kleinwächter, M. (2013). Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants. *Industrial Crops and Products, 42*, 558–566. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.020

Seyed Sharifi, R., & Gholinezhad, E. (2022). *Evaluation of agronomic and morphophysiological traits of crop plants*. Mohaghegh Ardabili University. [In Persian]

Turfan, N. (2022). Comparison of bulb yield, some bioactive compound, and elemental profile of Taşköprü garlic (*Allium sativum* L.) grown in greenhouse and open field conditions. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 19(*2), 248-261. https://doi.org/10.33462/jotaf.883014

Van Zelm, E., Zhang, Y., & Testerink, C. (2020). Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology, 71*, 403–433. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100005

Veisi, Z., Ghorbanpour, M., & Akramian, M. (2023). The effects of silicon nanoparticles on morpho-physiological and biochemical parameters of *Calendula officinalis* L. plants under salinity stress in hydroponic culture conditions. *Journal of Plant Process and Function, 11*(47), 211-229. https://jispp.iut.ac.ir/article-1-1548-fa.html

Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences, 14*(4), 7370-7390. https://doi.org/10.3390/ijms14047370

Wikenz, J., & Norfolk, N. R. (2010). *Eco-Physiology of economic plants in arid and semi-arid regions, Adaptations for desert living creatures.* Tehran University Press.

Yari, P., Alirezalu, A., & Khalili, S. (2025). A comparative study of chemical composition, phenolic compound profile and antioxidant activity of wild grown, field and greenhouse cultivated *Physalis* (*P. alkekengi* and *P. peruviana*). *Food Production, Processing and Nutrition, 7*(1), 19. https://doi.org/10.1186/s43014-024-00287-9

Zuzunaga-Rosas, J., Calone, R., Mircea, D. M., Shakya, R., Ibáñez-Asensio, S., Boscaiu, M., Vicente, O. (2024). Mitigation of salt stress in lettuce by a biostimulant that protects the root absorption zone and improves biochemical responses. *Frontiers in Plant Science, 15*, 1341714. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1341714