



Ecological Responses of Halophyte *Atriplex verucifera* to Salinity and Temperature Conditions during Seed Germination and Seedling Growth Stages

Fatemeh Divargar¹ | Farzad Sharifzadeh² | Houshang Alizadeh³

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: fatidivargar@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Sharifz@ut.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: halizade@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: August 07, 2024
Received in revised form:
January 19, 2025
Accepted: January 29, 2025
Published online: September
23, 2025

Keywords:

Cardinal temperatures,
chilling stress,
salinity stress,
seed germination,
seedling growth.

Extended Abstract

Introduction. The halophyte *Atriplex verucifera* is a valuable forage species that is also cultivated for other purposes such as rehabilitation of saline ecosystems, phytoremediation, and soil erosion control too. The germination process is a crucial stage in the lifespan of a plant that is delayed or inhibited in the face of salinity, osmotic, and extreme temperature conditions. On this subject, the performance of seed germination directly determines the successful seedling establishment and dynamics of plant communities. Hence, this study aimed to characterize the biological parameters of cardinal temperatures (T_b , T_{o1} , T_{o2} , and T_c) and to quantify the effect of NaCl-induced osmotic stress in the physiological parameters related to seed quality.

Materials and Methods. Seeds were surface sterilized by soaking in 2.5% sodium hypochlorite for 30 seconds (s) followed by 20 s in 30% alcohol, and then thoroughly rinsed in the sterile distilled water for several 60 s. Firstly, to determine cardinal temperatures, seed germination was conducted at wide range temperature from 1°C to 40°C at 5°C intervals in three replicates. In per replication, the germination test of 50 seeds was performed on top of two Whatman paper in a glassy petri dish including 8 ml of autoclaved distilled water. To evaluate the interaction effects of salinity and chilling conditions, germination of seeds was performed at the sodium chloride (NaCl) concentrations [Ψ] of zero (control), -0.4, -0.8, -1.2, -1.6, -2, -2.4, -2.8, and -3.4 MPa and a set of the wide range of constant temperatures [T] (1, 5, 10, 15, 20, and 25°C) as factorial completely randomized design. Seeds were germinated in glass Petri dishes (9 cm diameter) contained 8 ml of corresponding osmotic solutions without filter paper. The germination test was conducted in the incubator (Memmert GmbH + Co. KG, incubator, Germany, ± 0.5 °C precision) for 12 d.

Results and Discussion. Based on the dent-like model, the value of cardinal temperatures was estimated 0.031 °C for T_b , 15.36 °C for T_{o1} , 35.2 °C for T_{o2} , and 40.84 °C for T_c . Noticeably, the results of this study demonstrated that the high value of salinity tolerance in this plant during seed germination was observed at the temperature of 15 °C. At the temperature of 15 °C, the value of germination percentage at salinity levels of -2.8 and -3.2 MPa was 60% and 20%, respectively. Furthermore, at the high salinity level of -2.8 MPa, the normal seedling growth (by 20%) was only observed at the temperature of 15 °C compared to all examined temperatures. By increasing the temperature to 25 °C, the salinity tolerance in early growth stages was significantly declined compared with temperature of 15 °C, indicating the influence of T on salinity tolerance during germination.

Conclusion. The predicted lower value of base temperature (T_b) indicate a higher tolerance to chilling stress during seed germination, especially when they are exposed to salinity stress. The findings can be useful to identify the responses of seed ecology and then to determine the germination niche of this halophyte plant for its successful establishment in saline and cold ecosystems. However, the estimated of biological parameters (cardinal temperatures) and salinity response during germination suggest the possible that *Atriplex verucifera* is a tolerance halophyte to wide range of temperatures and osmotic stress.

Cite this article: Divargar, F., Sharifzadeh, F., & Alizadeh, H. (2025). Ecological responses of halophyte *Atriplex verucifera* to salinity and temperature conditions during seed germination and seedling growth stages. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(3), 67-81. Doi: 10.22059/ijfcs.2025.379171.655090.





انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شماره الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

پاسخ اکولوژیکی گیاه شورپسند *Atriplex verucifera* به شرایط مختلف تنش شوری و دما در مراحل جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه

فاطمه دیوارگر^۱ | فرزاد شریف‌زاده^۲ | هوشنگ علیزاده^۳

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: fatidivargar@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Sharifz@ut.ac.ir
۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: halizade@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: تنش سرما، تنش شوری، جوانه‌زنی بذر، دماهای پایه-بهینه-سقف، رشد گیاهچه.	گیاه شورپسند <i>Atriplex verucifera</i> یک گونه علوفه‌ای باارزش می‌باشد که برای اهداف مختلف از جمله احیای زیست‌بوم‌های شور، گیاه‌پالایی و جلوگیری از فرسایش خاک مورد کشت قرار می‌گیرد. جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه از مراحل حساس و حیاتی رشد گیاه می‌باشند. به این منظور، جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی (ناشی از کاربرد سدیم کلرید) و دما به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. برازش مدل دندان-مانند نشان داد که مقدار T_{O1}، T_b و T_{O2} به ترتیب برابر با ۰/۰۳۱، ۱۵/۳۶، ۳۵/۲ و ۴۰/۸۴ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شد. به طور قابل توجهی، نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین میزان تحمل بذر این گیاه به غلظت‌های شدید شوری در هنگام جوانه‌زنی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. به طوری که در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، درصد جوانه‌زنی در غلظت‌های شدید شوری ۲/۸- و ۳/۲- مگاپاسکال به ترتیب ۲۲ و ۶۰ درصد بود. همچنین با افزایش تنش شوری به ۲/۸- مگاپاسکال، رشد گیاهچه نرمال تا ۲۰ درصد فقط در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. با افزایش دما به ۲۵ درجه سانتی‌گراد، جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در غلظت شوری ۳/۲- مگاپاسکال نسبت به دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد به صفر کاهش یافت. در نهایت، این یافته‌ها می‌تواند در شناسایی پاسخ‌های محیطی بذر این گیاه شورپسند جهت استقرار موفقیت‌آمیز آن در زیست‌بوم‌های شور و سرد مفید واقع شود.

استناد: دیوارگر، ف.، شریف‌زاده، ف.، و علیزاده، ه. (۱۴۰۴). پاسخ اکولوژیکی گیاه شورپسند *Atriplex verucifera* به شرایط مختلف تنش شوری و دما در مراحل جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۶(۳)، ۶۷-۸۱.

DOI: 10.22059/ijfcs.2025.379171.655090



© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

شور شدن خاک و آب یکی از تنش‌های مهم غیرزنده محیطی می‌باشد که در عملکرد بهینه محصولات کشاورزی و پوشش گیاهی عرصه منابع طبیعی اختلال ایجاد می‌کند (Gill et al., 2024). شور شدن خاک عمدتاً به دلیل تجمع نمک‌های محلول در آب در نزدیک سطح خاک اتفاق می‌افتد که این نمک‌ها عمدتاً از یون‌های سمی سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+)، کلر (Cl^-) و سولفات (SO_4^{2-}) تشکیل می‌شوند (Ahmed et al., 2020). تنش شوری از طریق ایجاد پتانسیل اسمزی، القای تنش اکسیداتیو و سمیت یونی موجب اختلال در فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، جذب مواد غذایی و جذب آب شده که در نتیجه رشد و استقرار گیاه را با مشکل مواجه می‌کند (Pungin et al., 2023; Balasubramaniam et al., 2023). چندین روش اکولوژیکی، فیزیولوژیکی و ژنتیکی برای کنار آمدن با این مشکل پیشنهاد شده است که یکی از اقتصادی‌ترین و مناسب‌ترین روش‌ها شناسایی، مطالعه اکولوژیکی و معرفی گیاهان متحمل به تنش شوری از جمله گونه‌های ارزشمند شورپسند می‌باشد (Ghanem et al., 2021). در بسیاری از مطالعات روی گونه‌های شورپسند *H. sabdariffa* (Taghvaei et al., 2022)، *K. caspicum* (Tobe et al., 2000)، *S. liaotungensis* (Song et al., 2023)، *S. salsa* (Zhang et al., 2021)، *S. drummondii* (El-Keblawy et al., 2020) و *S. ferganica* (Ma et al., 2018) بیان شده است که نوع گونه گیاهی، مرحله رشدی گیاه، طول دوره تنش، میزان غلظت نمک، دمای محیط و کیفیت اولیه بذر تأثیر بالایی بر میزان متحمل‌بودن گیاه به تنش شوری در هنگام جوانه‌زنی دارد.

در چندین مطالعه روی جوانه‌زنی بذر گونه‌های شورپسند *H. pedunculata* (Khan et al., 2006)، *A. stocksii* (Al-Hawija et al., 2012)، *H. glomeratus* (Ahmed et al., 2020)، *S. drummondii* (Gairola et al., 2022) و *A. halimus* (Castañeda-Loaiza et al., 2024) گزارش شده است که غلظت‌های شدید شوری موجب کاهش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و در نتیجه کاهش رشد طبیعی گیاهچه شده و میزان خسارت شوری به بنیه بذر در هنگام جوانه‌زنی بستگی بالایی به دمای محیط داشته است.

یکی از عوامل محیطی دیگر که اثرات مخربی بر رشد و نمو طبیعی گیاه القا می‌کند، دمای پایین می‌باشد (Manasa et al., 2022). این تنش محیطی به‌خصوص در مراحل حساس رشدی گیاهان مانند جوانه‌زنی بذر و رشد اولیه گیاهچه از طریق کاهش جذب آب توسط بذر و القای تنش اکسیداتیو موجب کاهش تولید و عملکرد گیاه می‌شود (Soualiou et al., 2022). بنابراین کیفیت بذر از جمله درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، رشد طبیعی گیاهچه و شاخص بنیه بذر نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان متحمل‌شدن گیاه به تنش‌های محیطی دارد و به شدت تحت تأثیر دما، پتانسیل اسمزی ناشی از تنش شوری و به‌خصوص اثر متقابل دو پارامتر دما و شوری قرار می‌گیرد (Mohammadi et al., 2023).

جوانه‌زنی بذر و رشد اولیه گیاهچه از مهمترین مراحل چرخه زندگی گیاهان می‌باشد که در پراکنش جغرافیایی و رشد موفقیت-آمیز گیاهان به‌خصوص تحت شرایط نامساعد محیطی نقش مهمی دارد (Chen et al., 2021). لازم به ذکر است که این مراحل حیاتی و مهم رشدی گیاهان حتی در گونه‌های شورپسند حساسیت بالایی به تنش شوری و دمایی دارند (Gul et al., 2013). بنابراین تعیین دماهای کاردینال (دمای پایه، دمای بهینه و دمای سقف)، ترمال‌تایم (نیاز زمان-دمایی)، هیدروتایم (نیاز زمان-رطوبتی) و تعیین اثر دما بر واکنش‌پذیری گیاهان به تنش شوری می‌تواند در بهبود مطالعات اکولوژیکی جهت کشت موفقیت‌آمیز این گیاه در مناطق شور با تغییرات دمایی بالا موثر باشد (Secrafi et al., 2024). همچنین بیان شده است که در گونه‌های *H. strobilaceum* (Vicente et al., 2020)، *B. inermis* (Liu et al., 2021)، *P. karka* (Zehra & Khan, 2007) و *H. ericoides* (Qu et al., 2008) حد آستانه تحمل به تنش شوری بستگی بالایی به دمای محیط دارد. بنابراین دمای محیط به‌خصوص دماهای پایین‌تر از دمای بهینه و میزان غلظت شوری از طریق تأثیرگذاری بر شاخصه‌های زیستی هیدروتایم، پتانسیل پایه آبی، دمای پایه و ترمال‌تایم میزان سازگاری گیاه شورپسند و راهبرد متحمل‌شدن به تنش شوری را متغیر می‌کند (Zhang et al., 2012).

گیاه *Atriplex verucifera* یک گونه علوفه‌ای چندساله از خانواده *Chenopodiaceae* می‌باشد که یکی از گیاهان سازگار در اراضی شور می‌باشد (Khodaverdiloo et al., 2020). این گونه گیاهی شورپسند به عنوان یک گیاه علوفه‌ای دارای ارزش غذایی بالا برای دام‌ها می‌باشد که می‌تواند برای اهداف مهم و حیاتی از جمله احیای زیست‌بوم‌های شور، بیابان‌زدایی در مناطق خشک،

گیاه‌پالایی جهت اصلاح مراتع آلوده به عناصر سنگین، تجدید حیات طبیعی و همچنین به عنوان گیاه حفاظتی در تثبیت، کنترل زیستی خاک و جلوگیری از فرسایش آن مورد کشت قرار بگیرد (Nikdel et al., 2009; Liang et al., 2017). موفقیت در کشت این گونه گیاهی بارزش در زیست‌بوم‌های بایر و شور برای اهداف مختلف نیازمند مطالعه اکولوژیکی جوانه‌زنی و رشد گیاهچه تحت شرایط مختلف محیطی می‌باشد. همان‌طور که بیان شد مراحل اولیه رشد گیاهان حتی در گونه‌های شورپسند حساسیت بالایی به شرایط نامساعد محیطی دارند و در نتیجه نقش تعیین‌کننده‌ای در استقرار موفقیت آمیز گیاهان دارند. بنابراین، اهداف این مطالعه شامل موارد زیر بود: (۱) شناسایی پاسخ‌های اکولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه اترپلکس به سطوح مختلف تنش شوری، دمای پایین و اثر متقابل این دو تنش در مراحل اولیه رشد گیاه و (۲) تعیین دماهای کاردینال.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. جمع‌آوری نمونه گیاهی

ابتدا بذرهایی گونه *Atriplex verucifera* از بانک ذخایر ژنتیکی موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور ایران تهیه شد؛ نتایج پیش‌آزمایش نشان داد که قوه‌نامیه بذور ۸۵-۹۰ درصد بود. سپس جهت حفظ کیفیت اولیه بذر، بذرها تا زمان اجرای آزمایش در دمای یک درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (Mamedi et al., 2024). این مطالعه در آزمایشگاه علوم و تکنولوژی بذر دانشگاه تهران در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. در هنگام شروع هر بخش از آزمایش، ابتدا بذرها با آب مقطر شست‌وشو داده شد. در ادامه، بذرها در محلول هیپوکلرید سدیم (۲/۵ درصد) به مدت ۴۰ ثانیه ضدعفونی شدند و سپس فوراً با آب مقطر به‌طور کامل شست‌وشو شدند (Mamedi & Sharifzadeh, 2023).

۲-۲. تعیین دماهای کاردینال

در این بخش از آزمایش، کشت بذرها در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار ۵۰ بذری در پتری‌دیش شیشه‌ای (به قطر نه سانتی‌متر) که حاوی هفت میلی‌لیتر آب مقطر بود، روی دو لایه بستر کاغذی انجام شد. آزمون جوانه‌زنی بذر در ژرمیناتور (Memmert GmbH + Co. KG, Germany) با دماهای ثابت ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. طول دوره جوانه‌زنی به مدت ۱۲ روز بود که جهت برآورد سرعت جوانه‌زنی (Germination rate) برای تعیین دماهای کاردینال، شمارش بذرهایی جوانه‌زده به‌صورت روزانه انجام شد. برای تعیین سرعت جوانه‌زنی در هر یک از دماهای اعمال‌شده، از رابطه زیر استفاده شد (Mamedi & Afshari, 2018):

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{Germination rate (GR)} = \sum \left(\frac{G_t}{T_t} \right)$$

که G_t نشان‌دهنده تعداد کل بذرهایی جوانه‌زده در روز t و T_t نشان‌دهنده زمان جوانه‌زنی بر حسب روز می‌باشد. در نهایت، جهت پیش‌بینی دماهای پایه (T_b)، بهینه (T_o) و سقف (T_c)، داده‌های سرعت جوانه‌زنی (seed.d^{-1}) با مدل رگرسیونی دندان-مانند (Dent-like) برازش داده شد (Nazari et al., 2018):

رابطه (۲)

$$\begin{aligned} f(T) &= (T - T(b)) / (T_o1 - T_b) \text{ if } T(b) < T < T_o1 \\ f(T) &= (T_c - T) / (T_c - T_o2) \text{ if } T_o2 < T < T_c \\ f(T) &= 1 \text{ if } T_o1 \leq T \leq T_o2 \\ f(T) &= 0 \text{ if } T \leq T(b) \text{ or } T_c \leq T \end{aligned}$$

که T ، T_b ، T_o1 ، T_o2 و T_c به ترتیب نشان‌دهنده دمای محیط جوانه‌زنی، دمای پایه، دمای بهینه پایینی، دمای بهینه فوقانی و دمای سقف می‌باشند. دقت برازش مدل دندان-مانند با فراسنجه‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین رگرسیون (R^2) و معنی‌داری فاصله خط رگرسیون به خط نیمساز (1:1 line) بررسی شد (Moradi-Shakoorian et al., 2023).

۲-۳. تأثیر تنش شوری و دمای پایین بر مولفه‌های کیفیت بذر

در این بخش از آزمایش، اثر تنش شوری و دمای پایین بر صفات فیزیولوژیکی بذر مورد مطالعه قرار گرفت. برای اعمال تنش شوری از نمک سدیم کلرید (NaCl) استفاده شد. غلظت‌های مختلف تنش شوری بر حسب مگاپاسکال (MPa) با استفاده از رابطه شماره

(۳) تهیه شد تا اثر پتانسیل اسمزی (Ψ) ناشی از تنش شوری بر جوانه‌زنی بذر تعیین گردد. بنابراین، جوانه‌زنی بذر تحت تنش شوری در غلظت‌های صفر (شاهد)، $-۰/۴$ ، $-۰/۸$ ، $-۱/۲$ ، $-۱/۶$ ، -۲ ، $-۲/۴$ ، $-۳/۸$ ، $-۳/۲$ (MPa) و دماهای ثابت ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفت. این آزمون به صورت فاکتوریل (شوری $\times$ دما) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار ۵۰ بذری اجرا شد. آزمون جوانه‌زنی بذر در پتری‌دیش شیشه‌ای حاوی هفت میلی‌لیتر محلول شوری در ژرمیناتور بررسی شد. برای تهیه پتانسیل اسمزی غلظت‌های مختلف شوری از رابطه زیر استفاده شد (Lang, 1967):

$$\Psi_{(\text{NaCl})} = - \text{CIRT} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که Ψ ، C ، I ، R و T به ترتیب نشان‌دهنده پتانسیل اسمزی (مگاپاسکال)، غلظت مولالیت نمک (gL^{-1})، ضریب یونی نمک (برای نمک سدیم کلرید عدد یک می‌باشد)، ضریب فشار گاز ($۰/۰۸۳۱$) و دما بر حسب درجه کلوین می‌باشد. طول دوره آزمایش ۱۲ روز بود که در نهایت درصد جوانه‌زنی نهایی (Final germination percentage)، سرعت جوانه‌زنی برای دهک‌های ۳۰ (Germination rate of 30% seed population) و ۵۰ درصد (Germination rate of 50% seed population) از جمعیت بذر، درصد گیاهچه نرمال نمو یافته (Normal seedling growth)، طول گیاهچه (Seedling length) و شاخص ویگور بذر (Seed vigor index) مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری درصد جوانه‌زنی نهایی از رابطه زیر استفاده شد (Mamedi et al., 2022):

$$\text{Final germination percentage (FGP)} = \left(\frac{g}{50} \right) \times 100 \quad \text{رابطه (۴)}$$

که g نشان‌دهنده تعداد کل بذرهای جوانه‌زده در شرایط محیطی آزمون شده می‌باشد. زمان جوانه‌زنی دهک‌های (g) مختلف جمعیت بذر از جمله T_{30} و T_{50} با رابطه زیر پیش‌بینی شد (Mamedi & Sharifzadeh, 2023):

$$T_g = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)(g - g_1)}{(g_2 - g_1)} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که t_1 و t_2 به ترتیب نشان‌دهنده زمان جوانه‌زنی اولیه و ثانویه هستند، به شرطی که $t_2 > T_g > t_1$ باشد. همچنین g_1 و g_2 به ترتیب نشان‌دهنده درصد جوانه‌زنی مشاهده‌شده اولیه و ثانویه هستند، به شرطی که $g_2 > g > g_1$ باشد که در نهایت با عکس مقدار زمان برآوردشده هر کدام از دهک‌های جوانه‌زنی ($1/T_g$)، مقدار سرعت جوانه‌زنی درصدهای مختلف جمعیت بذر (GR_g) بر حسب ساعت ($1/h$) برآورد شد. در نهایت، شاخص ویگور بذر با معادله زیر محاسبه شد (Mamedi et al., 2024):

$$\text{Seed vigor index} = \text{Normal seedling length (cm)} \times \text{Germination (\%)} \quad \text{رابطه (۶)}$$

۴-۲. تجزیه و تحلیل آماری

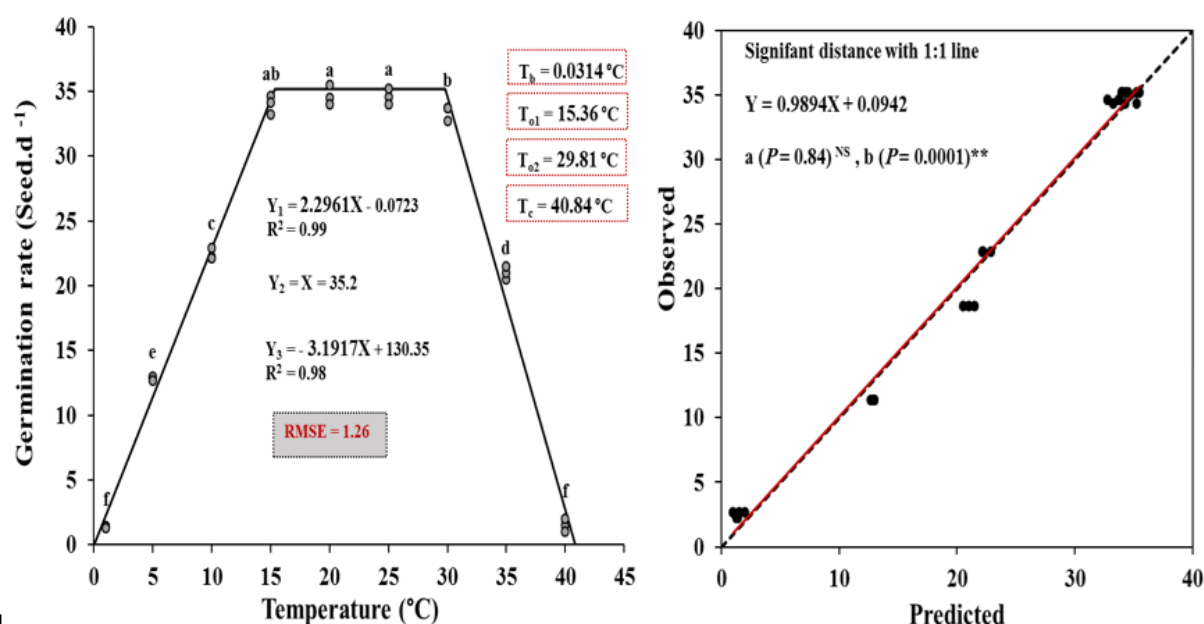
همه آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار ۵۰ بذری انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن (Duncan) در سطح احتمال یک درصد صورت گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از برنامه SAS 9.1 انجام شد و ترسیم نمودارها و داده‌پردازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. دماهای کاردینال

نتایج نشان داد که گیاه آتریپلکس از دمای ۱ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد قابلیت جوانه‌زنی را دارد و با افزایش دما به ۴۰ درجه سانتی‌گراد، جوانه‌زنی به طور چشمگیری کاهش یافت (شکل ۱). همچنین نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر سطوح مختلف دما بر سرعت جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود؛ به طوری که بیشترین سرعت جوانه‌زنی در دماهای ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (شکل ۱). بنابراین پنجره مجاز دمایی (T) برای جوانه‌زنی بذر این گیاه شورپسند در طیف وسیعی می‌باشد که نشان‌دهنده سازگار بودن آن به شرایط مختلف دمایی می‌باشد. نتایج برازش مدل دندان-مانند نشان داد که دمای بهینه تحتانی (T_{O1}) و فوقانی (T_{O2}) این گیاه به ترتیب ۱۵/۳۶ و ۳۵/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دماهای پایه (T_b) و سقف (T_c) جوانه‌زنی بذر به ترتیب ۰/۳۱ و ۴۰/۸۴ درجه سانتی‌گراد با دقت برازش بالا ($RMSE = 1.26$; $R^2 > 0.98$) پیش‌بینی گردید که نشان‌دهنده متحمل بودن این گیاه به تنش‌های شدید دمایی، به خصوص تنش سرما می‌باشد. همچنین بر اساس فراسنجه خط نیمساز (1:1)، مقادیر پیش‌بینی شده بر

مقادیر مشاهده شده از انطباق قابل قبولی برخوردار بودند که نشان دهنده دقت برازش مدل در تعیین پارامترهای بیولوژیکی دمایی می باشد (شکل ۱). بنابراین، این مدل می تواند به عنوان ابزار کنترلی در مدیریت کشت *Atriplex verucifera* به عنوان گیاه علوفه ای به خصوص در مناطق سرد و کوهستانی کمک کند. در چندین مطالعه روی جوانه زنی بذر گونه گیاهی *Hyoscyamus spp.* (Akbarfakhrabadi et al., 2023)، *C. quinoa* (Mamedi et al., 2021) و *T. terrestris* (Sarmadi et al., 2017)، مدل دندان - مانند با دقت مناسب دماهای کاردینال را برازش داده است. با توجه به پایین بودن دمای پایه و متحمل بودن به تنش سرما در هنگام جوانه زنی، می توان اظهار کرد که کشت و استقرار این گیاه در فصل های رشدی اواخر زمستان و یا اوایل بهار موفقیت آمیز خواهد بود، زیرا با بارندگی یا ذوب شدن برف مقدار آب قابل دسترس خاک برای رشد بهینه مراحل حساس اولیه گیاه فراهم می باشد. بنابراین، دماهای کاردینال به عنوان یک شاخص بیولوژیکی، می تواند برای شناخت و ارزیابی پراکنش جغرافیایی گونه های با ارزش متحمل به تنش، تعیین میزان محدودیت های دمایی رشد گیاه، شناسایی تاریخ کشت دقیق و پیش بینی مراحل حساس رشدی گیاهان جدید در علوم کشاورزی و اکولوژی منابع طبیعی بسیار مفید واقع شود (Sampayo-Maldonado et al., 2019; Bidgoly et al., 2018).



شکل ۱. تعیین دماهای کاردینال گیاه *Atriplex verucifera* با برازش داده های سرعت جوانه زنی (تعداد بذرهای جوانه زده در روز) با مدل دندان مانند (Dent-like model) و بررسی میزان انطباق مقدار پیش بینی شده (Predicted) با مقدار مشاهده شده (Observed) بر اساس فراسنجه خط نیمساز (1:1 line). (حروف انگلیسی متفاوت نشانگر تفاوت معنی دار میانگین ها در سطح احتمال یک درصد با استفاده از آزمون Duncan می باشد).

۲-۳. اثر تنش شوری و دمای پایین بر جوانه زنی بذر و رشد اولیه گیاهچه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تنش شوری، دما و اثر متقابل این دو عامل محیطی بر همه شاخص های کیفیت بذر از جمله درصد جوانه زنی نهایی (FGP) سرعت جوانه زنی دهک های ۳۰ (GR₃₀) و ۵۰ (GR₅₀) از جمعیت بذر، درصد رشد نرمال گیاهچه (NSP)، طول گیاهچه (SL) و شاخص ویگور بذر (SVI) در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۱).

جدول ۱. تجزیه واریانس صفات جوانه زنی بذر گیاه *Atriplex verucifera* تحت شرایط مختلف تنش شوری و دما.

* نشانگر اختلاف آماری معنی دار در سطح احتمال پنج درصد است.

Source of variation	df	Means of squares (MS)					
		FGP	GR ₍₃₀₎	GR ₍₅₀₎	NSP	SL	SVI
Salinity (Ψ)	8	11325.72*	0.001*	0.0004*	7739.82*	35.47*	23.59*
Temperature (T)	5	11706.59*	0.0014*	0.0005*	9268.66*	38.67*	22.70*
T $\times$ Ψ	40	712.64*	0.00009*	0.000036*	538.25*	2.43*	1.57*
Error	108	1.75	0.00000032	0.00000048	1.23	0.008	0.0079
Coefficient of variation (%)		2.79	5.55	11.05	3.87	5.47	6.73

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که صفات درصد جوانه‌زنی بذر (FGP)، سرعت جوانه‌زنی دهک‌های ۳۰ و ۵۰ از جمعیت بذر، درصد رشد گیاهچه نرمال، طول گیاهچه و شاخص ویگور بذر به طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش شوری و دمای پایین قرار گرفت (شکل ۲). در پتانسیل صفر مگاپاسکال، درصد جوانه‌زنی بذر تقریباً در همه سطوح دمایی بیش از ۷۰ درصد مشاهده شد، اما با افزایش شدید تنش سرما به دمای یک درجه سانتی‌گراد، درصد جوانه‌زنی بذر به ۳۳ درصد کاهش یافت. با کاهش پتانسیل اسمزی به ۱/۶- مگاپاسکال، درصد جوانه‌زنی در دماهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً ثابت ماند، اما در دماهای یک و پنج درجه سانتی‌گراد به ترتیب از ۳۳ و ۷۷ درصد (در پتانسیل صفر مگاپاسکال) به صفر و ۵۰ درصد کاهش یافت (شکل ۲). با افزایش پتانسیل اسمزی به ۲- مگاپاسکال، جوانه‌زنی در دمای پنج درجه سانتی‌گراد به صفر کاهش یافت، اما به طور قابل توجهی در تنش سرما ۱۰ درجه سانتی‌گراد، ۵۵ درصد جوانه‌زنی مشاهده شد. با افزایش شدید تنش شوری به ۲/۴-، ۲/۸- و ۳/۲- مگاپاسکال، جوانه‌زنی بذر فقط در دماهای بهینه ۱۵ (به ترتیب ۶۴، ۵۵ و ۱۸ درصد)، ۲۰ (به ترتیب ۶۶، ۴۷ و ۱۲ درصد) و ۲۵ (به ترتیب ۲۳، ۱۷ و نه درصد) درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که نشان‌دهنده حساس شدن بذر در هنگام جوانه‌زنی به دمای ۲۵ درجه در هنگام شرایط تنش شوری شدید می‌باشد. به عبارت دیگر، تنش سرمایی بهینه (۱۵ درجه سانتی‌گراد) حساسیت پاسخ جوانه‌زنی بذر را به پتانسیل-های اسمزی منفی‌تر تنش شوری کاهش داد، زیرا با افزایش دما به ۲۵ درجه سانتی‌گراد، درصد جوانه‌زنی به طور معنی‌داری در تنش شدید شوری (۲/۴-، ۲/۸- و ۳/۲- مگاپاسکال) کاهش یافت که نشان‌دهنده حساسیت این گونه گیاهی به دمای بالا در هنگام اعمال تنش شوری می‌باشد. به طور کلی، بذر گیاه در طیف وسیعی از پتانسیل اسمزی ناشی از تنش شوری قابلیت جوانه‌زنی را داشت که نشان‌دهنده متحمل بودن این گیاه به تنش شوری می‌باشد. اما میزان متحمل بودن به تنش شوری، بستگی بالایی به دمای محیط داشت که این نوعی پاسخ اکولوژی گیاه برای سازگار شدن به شرایط نامساعد محیطی می‌باشد.

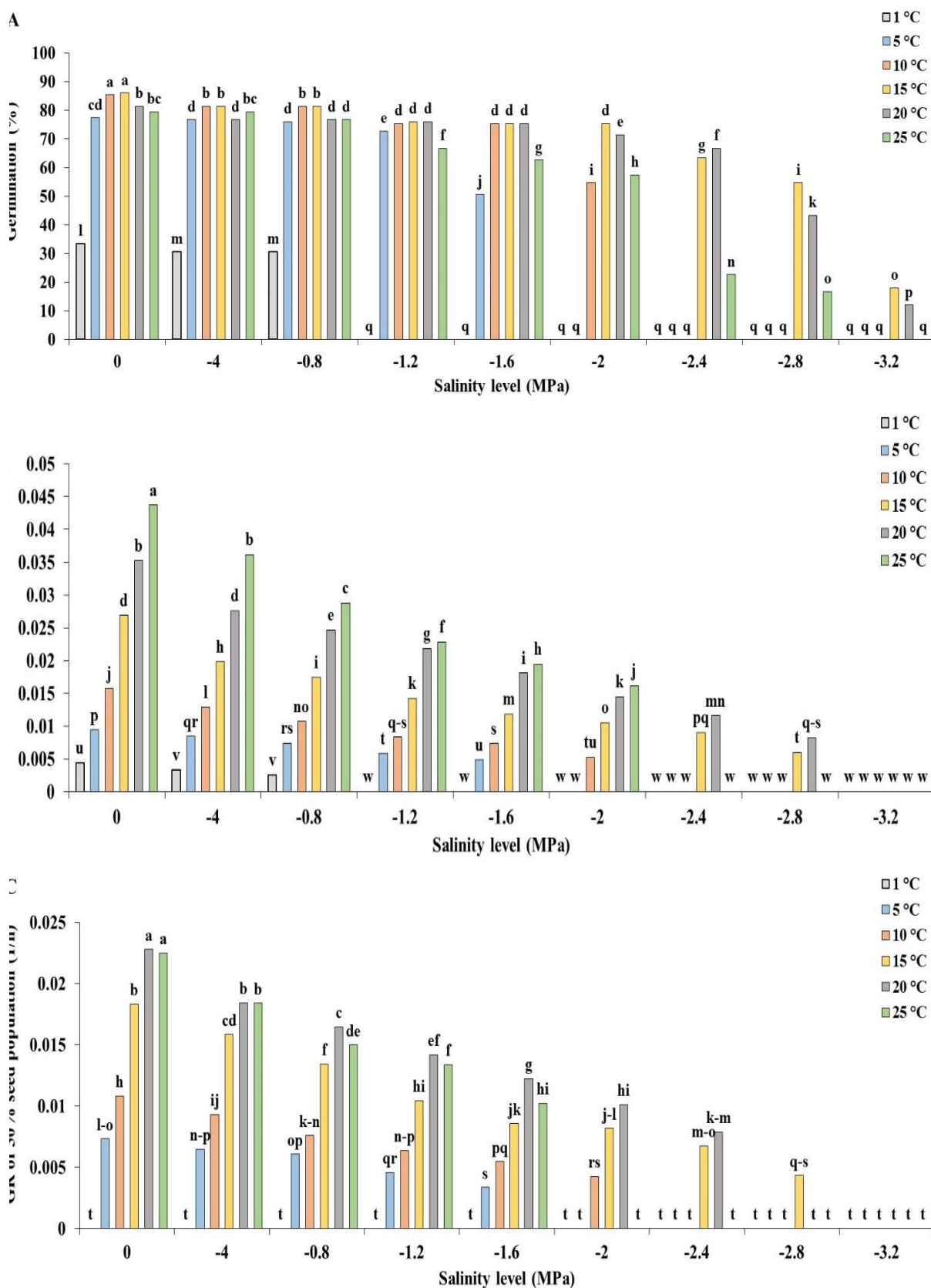
نتایج مقایسه میانگین نشان داد که سرعت جوانه‌زنی بذر دهک‌های مختلف جمعیت بذر نیز به طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح مختلف شوری و دمایی قرار گرفت. با کاهش تدریجی پتانسیل اسمزی، سرعت جوانه‌زنی به طور چشمگیری در همه دماها کاهش یافت که نشان‌دهنده حساسیت بالای این صفت به شرایط محیطی می‌باشد. برعکس درصد جوانه‌زنی، بیشترین مقدار سرعت جوانه‌زنی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. اما با افزایش تنش شوری به ۲/۴- و ۲/۸- مگاپاسکال بیشترین مقدار سرعت جوانه‌زنی دهک ۳۰ از جمعیت بذر در دماهای ۱۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد؛ زیرا، با افزایش دما به ۲۵ درجه سانتی‌گراد، درصد جوانه‌زنی در این دو پتانسیل شدید شوری به زیر ۲۰ درصد کاهش یافت (شکل ۲). همچنین نتایج نشان داد که با افزایش تنش شوری به ۲/۸- مگاپاسکال، بیشترین مقدار سرعت جوانه‌زنی دهک ۵۰ از جمعیت بذر در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد حاصل شد، زیرا با افزایش دما به ۲۰ درجه سانتی‌گراد، درصد جوانه‌زنی در این پتانسیل شوری به زیر ۵۰ درصد کاهش یافت (شکل ۲).

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تنش سرمایی ۱۵ درجه سانتی‌گراد موجب متحمل شدن گیاه به تنش شدید شوری در مراحل حساس اولیه رشدی می‌شود. به احتمال زیاد، این نوع پاسخ شاید یک نوع سازگاری اکولوژیکی گیاه به تنش شدید شوری می‌باشد، زیرا افزایش دما تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، موجب کاهش متحمل شدن گیاه در مراحل اولیه رشدی به تنش شدید شوری شد. در صورتی که کاهش جوانه‌زنی در شرایط شوری ناشی از سمیت یون باشد بهبود جوانه‌زنی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط شور حاکی از آن است که احتمالاً در این دما جذب یون‌ها توسط سلول‌های جنینی کاهش یافته و از سمیت یون کاسته شده و باعث بهبود جوانه‌زنی دمای ۱۵ نسبت به دماهای ۲۰ و دماهای گرم‌تر شده است.

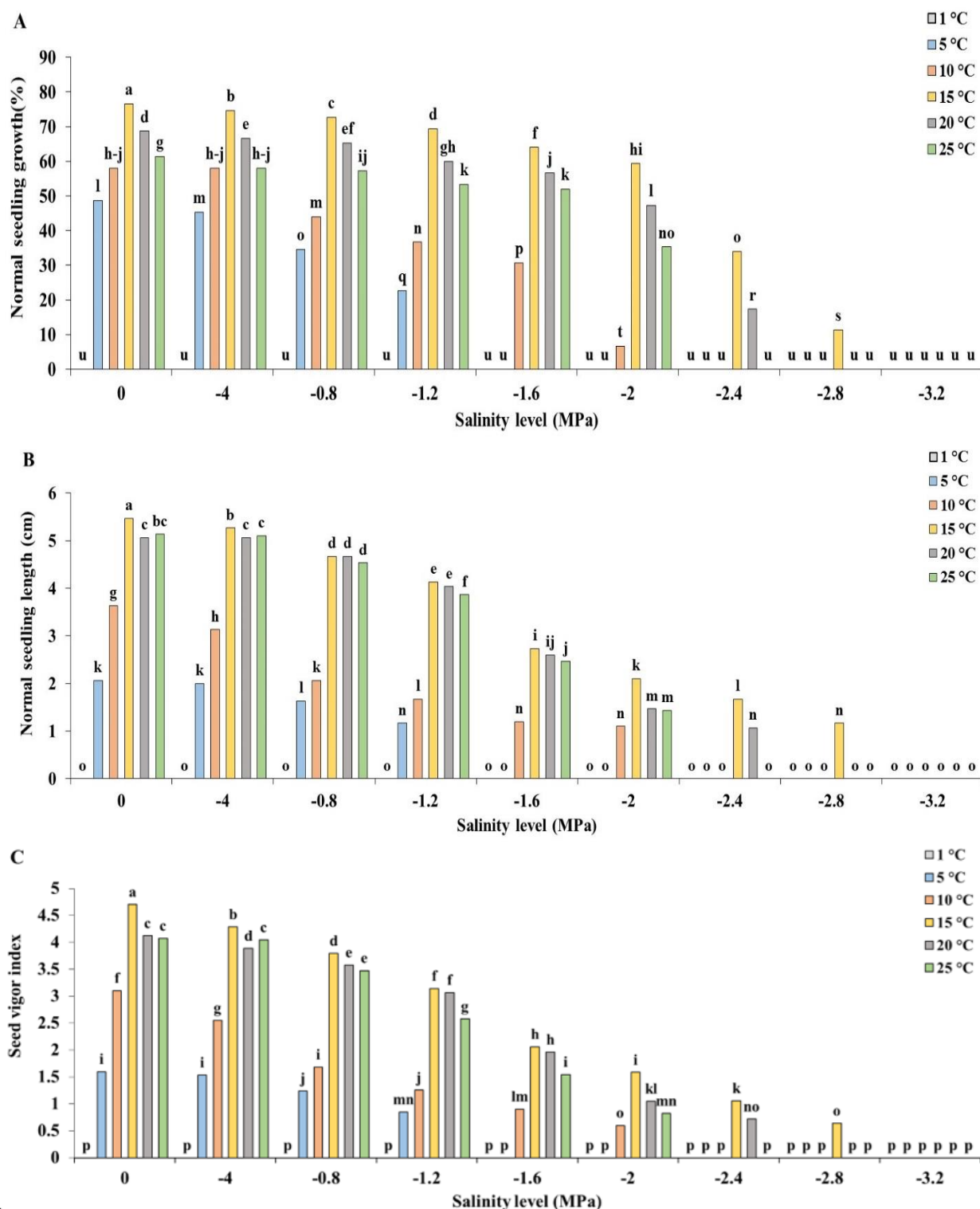
گزارش شده است که تنش شوری از طریق القای سمیت یونی، تنش اکسیداتیو و تنش اسمزی و در نتیجه تخریب بخش‌های حیاتی سلول موجب کاهش سرعت جوانه‌زنی شده و در نتیجه فرآیند جوانه‌زنی را با مشکل مواجه می‌کند (Hajihashemi et al., 2020). به‌طور کلی، نتایج نشان داد که بذرها قابلیت جوانه‌زنی در شدیدترین سطح شوری و تنش سرمایی را داشتند. در این رابطه گزارش شده است که سلول گیاهان شورپسند دارای بیشترین مقدار میتوکندری می‌باشد که در نتیجه انرژی لازم را برای زنده ماندن تحت شرایط نامساعد تنش محیطی مهیا می‌کند (Shahid et al., 2020). همچنین با توجه به قابلیت درصد و سرعت جوانه‌زنی بالا در غلظت‌های شدید شوری، می‌توان *Atriplex verucifera* را در دسته گیاهان شورپسند بسیار مقاوم قرار داد (Zhang et al., 2015). بنابراین شاخص‌های درصد و سرعت جوانه‌زنی از مهمترین پاسخ‌های اکوفیزیولوژیکی می‌باشند که در تعیین میزان متحمل بودن گونه‌های شورپسند *S. europaea* (Calone et al., 2020)، *H. perfoliata* (Alhaddad et al., 2021)، *S. drummondii* (El-Keblawy et al., 2020)، *S. maritima* (Seal et al., 2018) و *S. vermiculata* (Gairola et al., 2022) به تنش شوری و دما مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، زیرا این مراحل رشد و نمو در استقرار موفقیت‌آمیز و پراکنش اکولوژیکی گونه‌های شورپسند نقش تعیین‌کننده‌ای دارند.

صفات رشد گیاهچه نرمال، طول گیاهچه و شاخص ویگور بذر نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل دمای پایین و تنش شوری قرار گرفتند. برعکس صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی، بیشترین درصد گیاهچه نرمال در کلیه سطوح پتانسیل اسمزی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد حاصل شد (شکل ۳)؛ به‌طوری‌که با افزایش پتانسیل اسمزی به $-2/8$ بار، رشد گیاهچه نرمال فقط در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد و در سایر دماهای آزمون شده به‌طور کامل به صفر کاهش یافت. همچنین در پتانسیل اسمزی $-2/4$ مگاپاسکال، فقط در دماهای ۱۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد، رشد گیاهچه نرمال مشاهده شد که مقدار آن به‌ترتیب برابر با ۳۴ و ۱۶ درصد بود. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین شاخص‌های طول گیاهچه و ویگور بذر در تنش‌های شدید شوری در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (شکل ۳). همچنین با افزایش دما به ۲۵ درجه سانتی‌گراد، شاخص‌های فیزیولوژیکی جوانه‌زنی بذر در تنش شدید شوری به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که نشان‌دهنده اثر منفی دمای بالا به میزان متحمل شدن این گیاه به تنش شوری در هنگام رشد اولیه می‌باشد. بنابراین، بیشترین پاسخ‌های متحمل به تنش شدید شوری در دمای پایین ۱۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. این پاسخ نشان می‌دهد که استقرار گیاهچه این گیاه در اکوسیستم‌های شور، در دمای پایین ۱۵ درجه سانتی‌گراد موفقیت‌آمیز خواهد بود؛ زیرا نتایج نشان داد که حتی در تنش سرمایی شدید پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد، بذرها علاوه بر جوانه‌زنی، قابلیت ایجاد گیاهچه نرمال در تنش‌های شدید شوری (به‌ترتیب تا $-1/2$ و -2 مگاپاسکال) را داشتند (شکل ۳). لازم به ذکر است، در تنش سرمایی یک درجه سانتی‌گراد، بذرها تا دهک ۳۰ قابلیت جوانه‌زنی را داشتند، اما توانایی رشد و نمو بیشتر برای عبور به مرحله رشدی گیاهچه را نداشتند. همچنین در تنش شدید شوری $-3/2$ مگاپاسکال، توانایی بذرها برای عبور از مرحله رشدی جوانه‌زنی به گیاهچه نرمال در همه سطوح دمایی به صفر کاهش یافت.

در این مطالعه، تنش شدید سرما (یک درجه سانتی‌گراد) بنیه بذر به‌خصوص رشد طبیعی گیاهچه را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد. در این رابطه بیان شده است که تنش سرما به‌طور مستقیم از طریق تأثیر مخرب بر ساختار غشای سلول منجر به تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در سطح سلول می‌شود (Hassan et al., 2021). از بین رفتن ساختار غشاء در طول دوره تنش سرما، منجر به تغییر هدایت الکتریکی، انتقال یون‌ها، فرآیند طبیعی تنفس سلولی، ترکیبات چربی موجود در ساختار غشاء سلول و پتانسیل اسمزی درون سلول می‌شود که در نهایت منجر به کاهش رشد بهینه گیاه به‌خصوص در مراحل حساس رشدی می‌شود (Ritonga & Chen, 2020). در گیاهان متحمل به تنش سرما، فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند افزایش میزان پروتئین مرتبط با متحمل شدن به سرما (مانند LEA، HSP و دهیدرین‌ها)، کربوهیدرات محلول، آسمیلات‌ها، پرولین و آنتی‌اکسیدان‌ها موجب حفظ یکپارچگی و پایداری ساختار غشای سلول تحت تنش سرما می‌شوند (Saleem et al., 2021).



شکل ۲. مقایسه میانگین صفات درصد جوانه‌زنی (FGP, A) و سرعت جوانه‌زنی دهک‌های ۳۰ (GR₃₀, B) و ۵۰ (GR₅₀, C) از جمعیت بذر *Atriplex verucifera* تحت سطوح مختلف تنش شوری و دمای. حروف انگلیسی متفاوت نشانگر تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در سطح احتمال یک درصد براساس آزمون Duncan می‌باشد.



شکل ۳. مقایسه میانگین صفات درصد رشد گیاهچه نرمال (NSP, A)، طول گیاهچه (SL, B) و شاخص ویگور بذر (SVI, C) *Atriplex verucifera* تحت سطوح مختلف تنش شوری و دمایی. حروف انگلیسی متفاوت نشانگر تفاوت معنی دار میانگین‌ها در سطح احتمال یک درصد براساس آزمون Duncan می‌باشد.

بنابراین، قابلیت رشد گیاهچه با کاهش دما به ۱۵ درجه سانتی‌گراد به‌خصوص در غلظت‌های شدید شوری افزایش یافت که نشان‌دهنده اثر دمای پایین بر سازگار و متحمل شدن گیاه به تنش شوری می‌باشد. در چند مطالعه روی گونه‌های شورپسند *S. ramosissima* (Zhang et al., 2021) *S. salsa* (Qu et al., 2008) *H. strobilaceum* (Bhatt et al., 2020) *A. lagopoides*

(Mesa-Marín et al., 2019) و (El-Keblawy et al., 2018) *S. vermiculata* گزارش شده است که اثر متقابل عوامل محیطی دما و شوری نقش تعیین‌کننده در میزان متحمل شدن گیاه به تنش شوری در مراحل حساس اولیه رشدی دارد. همچنین به نظر می‌رسد که علت متحمل شدن این گیاه شورپسند به تنش‌های شدید شوری به دلیل استفاده از یون سدیم (Na^+) به عنوان تنظیم‌کننده و پایدار نگه‌داشتن پتانسیل اسمزی (Ψ) درون سلول و در نتیجه قابلیت جذب راحت آب در پتانسیل اسمزی منفی‌تر برای رشد و بسط سلول‌های گیاهی باشد (Rahman et al., 2021). به‌طور مشابه، در یک مطالعه بر جوانه‌زنی بذر گیاه شورپسند *D. harra* گزارش شده است که کاهش رشد گیاهیچه در تنش‌های شدید شوری در دماهای بالاتر و کمتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد، شاید به دلیل القای خواب ثانویه برای جلوگیری از زوال گیاهیچه و در نتیجه حفظ پایداری تراکم جمعیت گیاه در زیستگاه شور باشد (Tlig et al., 2008).

۴. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که گیاه *A. verucifera* در هنگام مواجهه با شرایط مختلف دمایی و پتانسیل اسمزی ناشی از تنش شوری، سازوکار جوانه‌زنی مختلفی داشت. یافته‌های این تحقیق نشان داد که در شرایط دمایی گرمتر (۲۵ درجه سانتی‌گراد) سرعت جوانه‌زنی در تنش شوری بهبود یافت، اما درصد جوانه‌زنی و رشد گیاهیچه نرمال کاهش یافت. به‌طوری‌که، بیشترین تحمل به تنش شدید شوری (۲/۸- مگاپاسکال) در هنگام جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهیچه در دمای پایین ۱۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که نشان‌دهنده اثر دما بر میزان متحمل شدن به تنش شوری در هنگام جوانه‌زنی بذر می‌باشد. بذر این گیاه در طیف وسیع دمایی (از یک تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد) قابلیت جوانه‌زنی را داشت. این یافته‌ها می‌تواند در تفسیر پاسخ‌های اکولوژیکی و فیزیولوژیکی جوانه‌زنی بذر این گیاه در بهبود متحمل شدن جوانه‌زنی بذر به تنش شوری و در نتیجه افزایش شانس استقرار موفقیت‌آمیز این گیاه در اکوسیستم‌های شور همراه با تنش دمایی بسیار مفید واقع شود. همچنین، اطلاعات به‌دست‌آمده از این مطالعه می‌تواند باعث درک بیشتر زیست‌شناس‌ها در برنامه‌های اصلاحی شده و برای بهبود رشد این گونه گیاهی در مناطق شور موثر واقع شود.

۵. منابع

- Ahmed, M.Z., Parveen, F., Gulzar, S., Gul, B., & Khan, M.A. (2020). Effects of chloride and sulfate salts on seed germination of halophytes from dry alpine climate. *Journal of Plant Nutrition*, 43(15), 2299-2310.
- Akbarfakhrabadi, A., Tavakkol Afshari, R., & Tolyat Abolhasani, M. (2023). Determination of cardinal temperatures and evaluation of seed germination response of five seed ecotypes of (*Hyoscyamus* spp.) medicinal plant to temperature and water potential. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 12(4), 1-17.
- Alhaddad, F.A., Abu-Dieyeh, M.H., ElAzazi, E.S.M., & Ahmed, T.A. (2021). Salt tolerance of selected halophytes at the two initial growth stages for future management options. *Scientific Reports*, 11(1), 10194.
- Al-Hawijja, B.N., Partzsch, M., & Hensen, I. (2012). Effects of temperature, salinity and cold stratification on seed germination in halophytes. *Nordic Journal of Botany*, 30(5), 627-634.
- Balasubramaniam, T., Shen, G., Esmacili, N., & Zhang, H. (2023). Plants' response mechanisms to salinity stress. *Plants*, 12(12), 2253.
- Bhatt, A., Gairola, S., Carón, M.M., Santo, A., Murru, V., El-Keblawy, A., & Mahmoud, T. (2020). Effects of light, temperature, salinity, and maternal habitat on seed germination of *Aeluropus lagopoides* (Poaceae): An economically important halophyte of arid Arabian deserts. *Botany*, 98(2), 117-125.
- Bidgoly, R.O., Balouchi, H., Soltani, E., & Moradi, A. (2018). Effect of temperature and water potential on *Carthamus tinctorius* (L.) seed germination: Quantification of the cardinal temperatures and modeling using hydrothermal time. *Industrial Crops and Products*, 113, 121-127.
- Calone, R., Sanoubar, R., Noli, E., & Barbanti, L. (2020). Assessing *Salicornia europaea* tolerance to salinity at seed germination stage. *Agriculture*, 10(2), 29.
- Chen, L., Lu, B., Liu, L., Duan, W., Jiang, D., Li, J., & Bai, Z. (2021). Melatonin promotes seed germination under salt stress by regulating ABA and GA₃ in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 162, 506-516.
- El-Keblawy, A., Al-Shamsi, N., & Mosa, K. (2018). Effect of maternal habitat, temperature and light on germination and salt tolerance of *Suaeda vermiculata*, a habitat-indifferent halophyte of arid Arabian deserts. *Seed Science Research*, 28(2), 140-147.

- El-Keblawy, A., Elnaggar, A., Tammam, A., & Mosa, K.A. (2020). Seed provenance affects salt tolerance and germination response of the habitat-indifferent *Salsola drummondii* halophyte in the arid Arabian deserts. *Flora*, 266, 151592.
- Hassan, M.A., Xiang, C., Farooq, M., Muhammad, N., Yan, Z., Hui, X., & Jincai, L. (2021). Cold stress in wheat: Plant acclimation responses and management strategies. *Frontiers in Plant Science*, 12, 676884.
- Gairola, S., Hameed, A., Rasheed, A., Alketbi, A., Aljasmi, M., & El-Keblawy, A. (2022). Seed germination and salinity tolerance of habitat-indifferent halophytes as associated with geographical distribution. *Seed Science and Technology*, 50(2), 125-140.
- Ghanem, A.M.F., Mohamed, E., Kasem, A.M., & El-Ghamery, A.A. (2021). Differential salt tolerance strategies in three halophytes from the same ecological habitat: Augmentation of antioxidant enzymes and compounds. *Plants*, 10(6), 1100.
- Gill, S., Ramzan, M., Naz, G., Ali, L., Danish, S., Ansari, M.J., & Salmen, S.H. (2024). Effect of silicon nanoparticle-based biochar on wheat growth, antioxidants and nutrients concentration under salinity stress. *Scientific Reports*, 14(1), 6380.
- Castañeda-Loaiza, V., Rodrigues, M.J., Fernandes, E., & Custódio, L. (2024). A Comparative study of the influence of soil and non-soil factors on seed germination of edible salt-tolerant species. *Horticulturae*, 10(8), 872.
- Gul, B., Ansari, R., Flowers, T.J., & Khan, M.A. (2013). Germination strategies of halophyte seeds under salinity. *Environmental and Experimental Botany*, 92, 4-18.
- Gairola, S., Hameed, A., Rasheed, A., Alketbi, A., Aljasmi, M., & El-Keblawy, A. (2022). Seed germination and salinity tolerance of habitat-indifferent halophytes as associated with geographical distribution. *Seed Science and Technology*, 50(2), 125-140.
- Hajjhashemi, S., Skalicky, M., Brestic, M., & Pavla, V. (2020). Cross-talk between nitric oxide, hydrogen peroxide and calcium in salt-stressed *Chenopodium quinoa* Willd. at seed germination stage. *Plant Physiology and Biochemistry*, 154, 657-664.
- Khan, M.A., Ahmed, M.Z., & Hameed, A. (2006). Effect of sea salt and L-ascorbic acid on the seed germination of halophytes. *Journal of Arid Environments*, 67(3), 535-540.
- Khodaverdilo, H., Han, F.X., Hamzenejad Taghliabad, R., Karimi, A., Moradi, N., & Kazery, J.A. (2020). Potentially toxic element contamination of arid and semi-arid soils and its phytoremediation. *Arid Land Research and Management*, 34(4), 361-391.
- Liang, L., Liu, W., Sun, Y., Huo, X., Li, S., & Zhou, Q. (2017). Phytoremediation of heavy metal contaminated saline soils using halophytes: Current progress and future perspectives. *Environmental Reviews*, 25(3), 269-281.
- Lang, A.R.G. (1967). Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solutions from 0 to 40 °C. *Australia Journal of Chemistry*, 20, 2017-2023.
- Liu, Y., Zhang, S., De Boeck, H.J., & Hou, F. (2021). Effects of temperature and salinity on seed germination of three common grass species. *Frontiers in Plant Science*, 12, 731433.
- Ma, Y., Wang, J., Zhang, J., Zhang, S., Liu, Y., & Lan, H. (2018). Seed heteromorphism and effects of light and abiotic stress on germination of a typical annual halophyte *Salsola ferganica* in cold desert. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2257.
- Mamedi, A., & Afshari, R.T. (2018). Evaluation of pre-harvest sprouting resistance and study of seedling establishment modeling and phonological characteristics in three cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 7(1), 213-221.
- Mamedi, A., Salehi, P., & Divargar, F. (2022). Response of *F. arundinacea* seed germination to temperatures, water potentials, and priming treatments using hydro-and thermal-time models. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(8), 1545-1558.
- Mamedi, A., & Sharifzadeh, F. (2023). Hydrotime analysis of *Chenopodium quinoa* seed germination responses to combined effects of NaCl-induced osmotic stress (Ψ), chilling temperature (T), and Ca^{2+} -priming treatment. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), 2299-2315.
- Mamedi, A., Sharifzadeh, F., & Amiri, R.M. (2021). Evaluation of quinoa seed germination variability to temperature, drought and saline stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 10(4), 57-67.
- Mamedi, A., Sharifzadeh, F., Maali-Amiri, R., & Divargar, F. (2024). Physiological and biological responses of Ca^{2+} -primed quinoa seed longevity stored at different hermetic storage conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-18.
- Manasa, L., Panigrahy, M., Panigrahi, K.C., & Rout, G.R. (2022). Overview of cold stress regulation in plants. *The Botanical Review*, 88(3), 359-387.
- Mesa-Marín, J., Pérez-Romero, J.A., Mateos-Naranjo, E., Bernabeu-Meana, M., Pajuelo, E., Rodríguez-Llorente, I.D., & Redondo-Gómez, S. (2019). Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on *Salicornia ramosissima* seed germination under salinity, CO_2 and temperature stress. *Agronomy*, 9(10), 655.

- Mohammadi, M., Pouryousef, M., & Farhang, N. (2023). Study on germination and seedling growth of various ecotypes of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) under salinity stress. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 34, 100481.
- Moradi-Shakoorian, Z., Delshad, M., Diaz-Perez, J.C., Askari-Sarcheshmeh, M.A., Nambeesan, S., & Mamedi, A. (2023). Onion (*Allium cepa* L.) seed germination affected by temperature and water potential: Hydrothermal time model. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 35, 100495.
- Nazari, M., Mamedi, A., & Hoseine, S. (2018). The evaluation response of onion (*Allium cepa*) seed germination to temperature by thermal-time analysis and determine cardinal temperatures by using nonlinear regression. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48(4).
- Nikdel, M., Sadaghian, B., Talebpour, A.H., & Shahmoradi, A.A. (2009). Introduction of the pests associated with *Atriplex verrucifera* MB and their distribution in East Azarbijan province rangelands. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 7(2), 90-99.
- Pungin, A., Lartseva, L., Loskutnikova, V., Shakhov, V., Popova, E., Skrypnik, L., & Krol, O. (2023). Effect of salinity stress on phenolic compounds and antioxidant activity in halophytes *Spergularia marina* (L.) Griseb. and *Glaux maritima* (L.) cultured in vitro. *Plants*, 12(9), 1905.
- Qu, X.X., Huang, Z.Y., Baskin, J.M., & Baskin, C.C. (2008). Effect of temperature, light and salinity on seed germination and radicle growth of the geographically widespread halophyte shrub *Halocnemum strobilaceum*. *Annals of Botany*, 101(2), 293-299.
- Rahman, M.M., Mostofa, M.G., Keya, S.S., Siddiqui, M.N., Ansary, M., Das, A., & Tran, L. (2021). Adaptive mechanisms of halophytes and their potential in improving salinity tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(19), 10733.
- Ritonga, F.N., & Chen, S. (2020). Physiological and molecular mechanism involved in cold stress tolerance in plants. *Plants*, 9(5), 560.
- Sampayo-Maldonado, S., Ordoñez-Salanueva, C.A., Mattana, E., Ulian, T., Way, M., Castillo-Lorenzo, E., & Flores-Ortíz, C.M. (2019). Thermal time and cardinal temperatures for germination of *Cedrela odorata* (L.). *Forests*, 10(10), 841.
- Sarmadi, A., Afshari, R.T., Mashhadi, H.R., & Mamedi, A. (2017). Cardinal temperatures for germination of *Tribulus terrestris*. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48(2), 413-419.
- Seal, C.E., Barwell, L.J., Flowers, T.J., Wade, E.M., & Pritchard, H.W. (2018). Seed germination niche of the halophyte *Suaeda maritima* to combined salinity and temperature is characterized by a halothermal time model. *Environmental and Experimental Botany*, 155, 177-184.
- Secrafi, M., Bakhshandeh, E., Boughalleb, F., & Abdellaoui, R. (2024). Exploring temperature and salinity effects on seed germination in North African pastoral grasses: A halo-thermal modeling approach in the context of climate change. *Environmental and Experimental Botany*, 222, 105765.
- Shahid, M.A., Sarkhosh, A., Khan, N., Balal, R. M., Ali, S., Rossi, L., & Garcia-Sanchez, F. (2020). Insights into the physiological and biochemical impacts of salt stress on plant growth and development. *Agronomy*, 10(7), 938.
- Song, J., Wang, H., Chu, R., Zhao, L., Li, X., An, S., & Li, Q. (2023). Differences in physiological characteristics, seed germination, and seedling establishment in response to salt stress between dimorphic seeds in the halophyte *Suaeda liaotungensis*. *Plants*, 12(6), 1408.
- Saleem, M., Fariduddin, Q., & Janda, T. (2021). Multifaceted role of salicylic acid in combating cold stress in plants: A review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(2), 464-485.
- Soualiou, S., Duan, F., Li, X., & Zhou, W. (2022). Crop production under cold stress: An understanding of plant responses, acclimation processes, and management strategies. *Plant Physiology and Biochemistry*, 190, 47-61.
- Taghvaei, M., Nasrolahizadehi, A., & Mastinu, A. (2022). Effect of light, temperature, salinity, and halopriming on seed germination and seedling growth of *Hibiscus sabdariffa* under salinity stress. *Agronomy*, 12(10), 2491.
- Tlig, T., Gorai, M., & Neffati, M. (2008). Germination responses of *Diploaxis harra* to temperature and salinity. *Flora*, 203(5), 421-428.
- Tobe, K., Li, X., & Omasa, K. (2000). Seed germination and radicle growth of a halophyte, *Kalidium caspicum* (Chenopodiaceae). *Annals of Botany*, 85(3), 391-396.
- Vicente, M.J., Martínez-Díaz, E., Martínez-Sánchez, J.J., Franco, J.A., Bañón, S., & Conesa, E. (2020). Effect of light, temperature, and salinity and drought stresses on seed germination of *Hypericum ericoides*, a wild plant with ornamental potential. *Scientia Horticulturae*, 270, 109433.
- Zehra, A., & Khan, M.A. (2007). Comparative effect of NaCl and sea salt on germination of halophytic grass *Phragmites karka* at different temperature regimes. *Pakistan Journal of Botany*, 39(5), 1681-1694.
- Zhang, H., Hu, M., Ma, H., Jiang, L., Zhao, Z., Ma, J., & Wang, L. (2021). Differential responses of dimorphic seeds and seedlings to abiotic stresses in the halophyte *Suaeda salsa*. *Frontiers in Plant Science*, 12, 630338.

- Zhang, H., Irving, L.J., Tian, Y., & Zhou, D. (2012). Influence of salinity and temperature on seed germination rate and the hydrotimic model parameters for the halophyte, *Chloris virgata*, and the glycophyte, *Digitaria sanguinalis*. *South African Journal of Botany*, 78, 203-210.
- Zhang, H., Zhang, G., Lü, X., Zhou, D., & Han, X. (2015). Salt tolerance during seed germination and early seedling stages of 12 halophytes. *Plant and Soil*, 388, 229-241.

