Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Crop Breeding Vol. 18, Issue 3, 2026 p: 139-156 OPEN ACCESS

Research Paper

The Combined Effect of Salinity and Water Deficit on Germination and Physiological Responses of Three Iranian *Salicornia persica* Ecotypes under Greenhouse Conditions in Zanjan

Peyman Akbarzade[1], Mehran Akbarzadeh[2], Hassan Shadman[3], Farha Aghajanlou[4], and Ghobad Rostami Zad[5]

1- Research Fellow, Forest and Rangeland Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Zanjan, Iran, (Corresponding author: p.akbarzadeh@areeo.ac.ir)
2- Ph. D. in Environmental Engineering, Malayer University, Grape Research Institute, Malayer, Hamedan, Iran
3- Research Fellow, Watershed Management Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Zanjan, Iran
4- Research Assistant Professor, Forest and Rangeland Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Zanjan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zanjan, Iran
5- Research Assistant Professor, Watershed Management Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Zanjan, Iran

Received: 15 January, 2026 Revised: 30 May, 2026 Accepted: 15 June, 2026

Extended Abstract

Background: *Salicornia persica* is a promising halophyte for sustainable agriculture in saline and arid regions, providing forage, seed oil, and edible shoots. The germination stage is highly sensitive to salinity and drought, which often co-occur in coastal and inland saline ecosystems. Zanjan Province, characterized by a cold semi-arid climate, 200–300 mm annual rainfall, severe winters, and increasing river salinity, poses particular challenges for establishing *Salicornia*. Successful cultivation depends on identifying tolerant ecotypes and optimizing early-stage irrigation. Previous studies mostly examined salinity or drought separately, leaving their combined effects on Iranian ecotypes underexplored. This study aimed to evaluate the interactive effects of four irrigation water salinity levels (control ≈0.5, 10, 30, and 50 dS/m) and three field capacity (FC) levels (100%, 75%, and 50%) on the germination percentage, germination rate, seedling growth, and stress physiology of three native ecotypes (Central, Gorgan, and Bushehr) under controlled greenhouse conditions. Secondary objectives included identifying critical stress thresholds, ranking ecotype tolerance, generating a germination heatmap, and proposing practical irrigation protocols.

Methods: The experiment was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with three replicates in a research greenhouse in Zanjan (UTM Zone 39, E: 269962 m, N: 40680674 m). Treatments comprised four salinity levels, prepared by dissolving NaCl in distilled water and verified using an EC meter, and three water regimes based on the pot weight. After cleaning, seeds of *S. persica* were collected from native habitats (Central: Iranian Plateau; Gorgan: Caspian coast; Bushehr: Persian Gulf coast) and surface-sterilized with 1% sodium hypochlorite. Fifty seeds (~0.1–0.13 g) were sown in 5-kg plastic pots filled with loamy soil (FC = 1300 g water). Pots were arranged in three lines (one ecotype per line), totaling 108 pots. Irrigation was applied daily to maintain target weights (100% FC: 1300 g; 75% FC: 975 g; 50% FC: 650 g). Germination was recorded daily for 14 days. The germination rate index (GRI) was calculated using Maguire's formula. Root and shoot lengths were measured. Proline (Bates method), glycine betaine (Grieve & Grattan), SOD and CAT activities (spectrophotometry), and total protein (Bradford method) were quantified from fresh leaf samples. A germination heatmap was generated using Python 3.11. Statistical analyses, including Two-Way ANOVA, Tukey's HSD, linear regression, and PCA, were performed in SPSS 26.

Results: Two-Way ANOVA revealed highly significant effects of salinity ($F > 150$), FC ($F = 123.89$), and their interaction ($F = 14.27$) on the germination percentage ($p < 0.001$). Under optimal conditions (control water + 100% FC), Bushehr, Gorgan, and Central achieved 95%, 85%, and ~85% germination, respectively. At 50 dS/m with full irrigation, germination dropped to 25%, ~15%, and ~15%, respectively. Reducing irrigation amplified salinity stress. At 50 dS/m

Copyright ©2026. Akbarzade et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

+ 50% FC, Bushehr retained 15%, Gorgan ~8%, and Central near 0%. Tukey's test confirmed significant differences among all salinity and irrigation levels ($p < 0.001$). Linear regression indicated that each 1 dS/m increase in salinity reduced germination by 1.27%, and each 1% decrease in soil moisture reduced it by 0.34%. The Bushehr ecotype showed a positive and significant coefficient, reflecting its superior tolerance. Seedling growth decreased under severe stress, while osmolyte accumulation and antioxidant enzyme activities increased, especially in Bushehr, demonstrating robust stress defense. Proline increased from 5 to 15 µmol/g FW, glycine betaine from 6 to 18 µmol/g FW, SOD from 100 to 120 units, and CAT from 80 to 100 units. The heatmap illustrated a gradual decline in germination from 95% (red) to ~0% (dark green). PCA explained 64.9% of variance along PC1 (salinity–germination trade-off) and 33.3% along PC2 (moisture effect), with Bushehr and Central clustering in the high-germination and low-germination zones, respectively.

Conclusion: Combined salinity and drought exert a synergistic negative effect on *Salicornia* germination. Bushehr showed the highest tolerance, Central the greatest sensitivity, and Gorgan intermediate performance. With full irrigation (100% FC) and low-salinity water (< 10 dS/m) during the first 10–14 days, Bushehr is recommended for successful cultivation in saline and water-limited areas, such as Zanjan. After establishment, plants tolerate up to 50 dS/m and 50% FC. These findings provide a scientific foundation for ecotype selection, irrigation management, and breeding programs aimed at sustainable cultivation and rehabilitation of saline lands.

Keywords: Field capacity, Germination, Plant growth, Salicornia, Water salinity

How to Cite This Article: Akbarzadeh, P., Akbarzadeh, M., Shadman, H., Aghajanlou, F., & Rostami Zad, Gh. (2026). The Combined Effect of Salinity and Water Deficit on Germination and Physiological Responses of Three Iranian Salicornia persica Ecotypes under Greenhouse Conditions in Zanjan. *J Crop Breed*, 18(3), 139-156. DOI: 10.66224/jcb.2026.1646

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

مقاله پژوهشی

بررسی اثر ترکیبی شوری و کم‌آبی بر جوانه‌زنی و پاسخ‌های فیزیولوژیکی سه اکوتیپ ایرانی *Salicornia persica* در شرایط گلخانه‌ای استان زنجان

پیمان اکبرزاده[۱]، مهران اکبرزاده[۲]، حسن شادمان[۳]، فرهاد آقاجانلو[۴] و قباد رستمی زاد[۵]

۱- محقق پژوهشی، گروه جنگل و مرتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران، (نویسنده مسوول: p.akbarzadeh@areeo.ac.ir)

۲- دکترای تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشگاه ملایر، پژوهشکده انگور، همدان، ایران

۳- محقق پژوهشی، گروه آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران

۴- استادیار پژوهشی، گروه جنگل و مرتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران

۵- استادیار پژوهشی، گروه آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵
صفحه: ۱۳۹ تا ۱۵۶

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: سالیکورنیا (*Salicornia persica*) یکی از گیاهان هالوفیت بومی ایران است که به‌دلیل توانایی رشد در خاک‌ها و آب‌های شور، ظرفیت بالایی برای استفاده در کشاورزی پایدار، احیای اراضی شور، تولید علوفه، دانه‌های روغنی و سبزی خوراکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. با این وجود، مرحله جوانه‌زنی این گیاه نسبت به تنش شوری و کم‌آبی حساس است؛ بنا بر این، موفقیت استقرار اولیه آن در کشت مستقیم تا حد زیادی به این دو عامل بستگی دارد. در شرایط طبیعی، به‌ویژه در نواحی ساحلی و ماسه‌زارهای شور، شوری و کم‌آبی معمولاً به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند؛ از این‌رو، اثر هم‌زمان آن‌ها می‌تواند بسیار شدیدتر از اثر هرکدام به‌تنهایی باشد. استان زنجان با اقلیم نیمه‌خشک سرد، میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و زمستان‌های سرد، همچنین روند افزایشی شوری منابع آبی همچون زنجان‌رود و قزل‌اوزن، بستر مناسبی برای بررسی کشت گیاهان شورزی است. هرچند که تاکنون پژوهش‌های مختلفی درباره تحمل شوری یا کم‌آبی سالیکورنیا انجام شده‌اند، اما مطالعات مربوط به اثر هم‌زمان این دو تنش بر جوانه‌زنی اکوتیپ‌های بومی ایران محدود هستند. بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر ترکیبی چهار سطح شوری آب آبیاری (آب معمولی تقریباً ۰/۵، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر) و سه سطح ظرفیت زراعی شامل ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد FC بر درصد و سرعت جوانه‌زنی، رشد گیاهچه و پاسخ‌های فیزیولوژیکی سه اکوتیپ بومی سالیکورنیا (مرکزی، گرگان و بوشهر) در شرایط گلخانه‌ای زنجان بوده است. همچنین، شناسایی اکوتیپ مقاوم‌تر، تعیین آستانه‌های بحرانی تنش، ارائه الگوی مناسب مدیریت آبیاری و تهیه نقشه حرارتی پاسخ جوانه‌زنی از دیگر اهداف این پژوهش به‌شمار می‌روند.

مواد و روش‌ها: آزمایش‌های مربوط به این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی استان زنجان (مختصات UTM: زون ۳۹، طول شرقی ۲۶۹۹۶۲ متر و عرض شمالی ۴۰۶۸۰۶۷۴ متر) به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شدند. فاکتور نخست شامل چهار سطح شوری آب آبیاری (آب معمولی تقریبا ۰/۵، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر) و فاکتور دوم شامل سه سطح ظرفیت زراعی (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد FC) بودند. سه اکوتیپ *S. persica* از رویشگاه‌های طبیعی شامل فلات مرکزی، حاشیه دریای خزر و سواحل خلیج‌فارس به‌ترتیب به‌عنوان اکوتیپ‌های مرکزی، گرگان و بوشهر جمع‌آوری شدند. بذرها پس از جداسازی، با محلول ۱ درصد هیپوکلریت سدیم ضدعفونی شدند. سپس در هر گلدان پلاستیکی ۵ کیلوگرمی، ۵۰ بذر (حدود ۰/۱ تا ۰/۱۳ گرم) کشت شدند. خاک مورد استفاده ترکیبی از خاک لومی با ظرفیت زراعی ۱۳۰۰ گرم آب بود. برای تعیین میزان آبیاری، وزن گلدان‌ها در شرایط خشک و اشباع اندازه‌گیری شد و آبیاری بر اساس وزن هدف انجام گرفت؛ به‌طوری‌که در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، مقدار آب ۱۳۰۰ گرم، در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، ۹۷۵ گرم و در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، ۶۵۰ گرم در نظر گرفته شد. آرایش آزمایشی شامل سه لاین (هر لاین مربوط به یک اکوتیپ) با ۳۶ گلدان در هر لاین بود. از این‌رو، مجموع تعداد گدان‌ها برابر با ۱۸۰ عدد بود. برای تنظیم کردن مقدار شوری از ECمتر تنظیم استفاده شد و آبیاری روزانه بر اساس میزان تبخیر انجام شد. همچنین، درصد جوانه‌زنی در طول آزمایش به‌صورت روزانه ثبت شد و سرعت جوانه‌زنی با استفاده از فرمول Maguire محاسبه شد. برای اندازه‌گیری طول ریشه و ساقه از خط‌کش استفاده شد. مقادیر پرولین به‌روش Bates، گلیسین‌بتائین به‌روش Grieve و Grattan، فعالیت آنزیم‌های SOD و CAT با استفاده از اسپکتروفتومتری و پروتئین کل به‌روش Bradford اندازه‌گیری شدند. در نهایت، نقشه حرارتی با استفاده از زبان پایتون نسخه ۳/۱۱ تهیه و تحلیل‌های آماری شامل ANOVA دوطرفه، آزمون توکی، رگرسیون و تحلیل مؤلفه اصلی با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شدند.

یافته‌ها: نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) نشان دادند که اثر شوری ($F > 150$)، ظرفیت زراعی ($F = ۱۲۳/۸۹$) و همچنین اثر متقابل آن‌ها ($F = ۱۴/۲۷$) بر درصد جوانه‌زنی در سطح احتمال ۰/۰۰۱ و کمتر معنی‌دار بودند. در شرایط بهینه (آب معمولی + ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، اکوتیپ بوشهر با ۹۵ درصد بیشترین جوانه‌زنی را نشان داد، در حالی‌که اکوتیپ‌های گرگان و مرکزی هر دو حدود ۸۵ درصد جوانه‌زنی داشتند. با افزایش شوری به ۵۰ دسی زیمنس بر متر در شرایط آبیاری کامل، درصد جوانه‌زنی در اکوتیپ بوشهر به ۲۵ درصد و در اکوتیپ‌های گرگان و مرکزی به حدود ۱۵ درصد کاهش یافت. از سوی دیگر، کاهش آبیاری نیز اثر شوری را تشدید کرد، به‌طوری‌که در ترکیب شوری بیش از ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر با ۵۰ درصد FC، درصد جوانه‌زنی در اکوتیپ بوشهر به حدود ۱۵ درصد، در اکوتیپ گرگان به حدود ۸ درصد و در اکوتیپ مرکزی تقریباً به صفر رسید. همچنین، نتایج آزمون توکی نشان دادند که تمام سطوح شوری و آبیاری از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ($P < ۰/۰۰۱$). تحلیل رگرسیون خطی انجام‌شده نشان داد که با هر واحد افزایش شوری، حدود ۱/۲۷ درصد از جوانه‌زنی کاسته شد و هر یک درصد کاهش رطوبت نیز حدود ۰/۳۴ درصد از جوانه‌زنی کاست. در این میان، ضریب مربوط به اکوتیپ بوشهر مثبت و معنی‌دار بود. همچنین، سرعت جوانه‌زنی در این اکوتیپ از ۴/۵ به ۲/۱ (GRI (day^{-1}) کاهش یافت، و طول ریشه از ۳/۲ به ۱/۱ سانتی‌متر و طول ساقه از ۲/۸ به ۰/۹ سانتی‌متر رسید. در بررسی شاخص‌های فیزیولوژیک، بیشترین افزایش در اکوتیپ بوشهر مشاهده شد؛ به نحوی که مقادیر پرولین از ۵ به ۱۵ میکرو مول بر گرم وزن تر (µmol/g FW)، گلیسین‌بتائین از ۶ به ۱۸، فعالیت SOD از ۱۰۰ به ۱۲۰ و CAT از ۸۰ به ۱۰۰ افزایش یافتند. نقشه حرارتی نیز روند کاهش تدریجی جوانه‌زنی را نشان داد. از سوی دیگر، نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نیز این الگو را تأیید کردند؛ به‌طوری‌که مؤلفه اول (PC1) با ۶۴/۹ درصد از واریانس، تضاد بین شوری و جوانه‌زنی را نشان داد و مؤلفه دوم (PC2) با ۳۳/۳ درصد از واریانس کل، اثر رطوبت را مشخص کرد. در این تحلیل، اکوتیپ بوشهر در ناحیه مقاوم و اکوتیپ مرکزی در ناحیه حساس قرار گرفتند.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی اثر هم‌افزایی منفی بر مرحله جوانه‌زنی گیاه سالیکورنیا دارد. در میان اکوتیپ‌های بررسی‌شده، اکوتیپ بوشهر به‌عنوان مقاوم‌ترین و اکوتیپ مرکزی به‌عنوان حساس‌ترین مورد شناسایی شدند، در حالی‌که اکوتیپ گرگان در جایگاه متوسط قرار گرفت. بر اساس یافته‌ها، برای دستیابی به کشت موفق در مناطق شور و کم‌آب نظیر زنجان، پیشنهاد می‌شود که اکوتیپ بوشهر انتخاب شود و در ۱۰ تا ۱۴ روز اولیه کشت، رطوبت خاک در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی حفظ شود. همچنین، ضروری است که در این مرحله از آب با شوری کمتر از ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر استفاده گردد. با این حال، پس از استقرار اولیه گیاهچه، تحمل گیاه افزایش می‌یابد و شوری تا ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر و آبیاری در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز قابل‌قبول خواهد بود. در نهایت، این نتایج می‌توانند مبنای عملی ارزشمندی را برای تدوین پروتکل‌های کشت، مدیریت بهینه آبیاری و پیشبرد برنامه‌های به‌نژادی در این حوزه فراهم آورند.

واژه‌های کلیدی: شوری آب، ظرفیت زراعی، جوانه‌زنی، سالیکورنیا، رشد گیاه

مقدمه

سالیکورنیا (*Salicornia persica* A.) یک گیاه هالوفیت بومی ایران است که به‌دلیل توانایی رشد در خاک‌ها و آب‌های شور، پتانسیل قابل‌توجهی برای کشاورزی پایدار، احیای اراضی شور و همچنین تولید علوفه، دانه روغنی و مصرف به‌عنوان سبزی خوراکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک را دارد (Koshida *et al.,* 2025). این موضوع باعث شده است که سالیکورنیا به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان گونه‌ای مهم در توسعه منابع غذایی و کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار گیرد. تحمل شوری در این گیاه عمدتاً از طریق سه مکانیسم فیزیولوژیک اصلی صورت می‌گیرد: ۱- تنظیم یونی، ۲- تجمع اسمولیت‌های سازگار مانند پرولین و قندها و ۳- فعال‌سازی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی. برای نمونه، در مطالعه‌ای بر روی گونه اروپایی سالیکورنیا (*S. europaea*) که تحت تنش‌های هم‌زمان شوری و غرقابی قرار گرفت، نتایج نشان دادند که این گیاه از طریق تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با انتقال یون‌ها و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، با شرایط تنش ترکیبی مقابله کرد (Jordine, 2025). مجموعه این سازوکارها امکان سازگاری این گیاه با شرایط شور را فراهم کرده است. با این حال، میزان حساسیت سالیکورنیا در مراحل مختلف چرخه زندگی یکسان نیست و مرحله جوانه‌زنی به‌ویژه نسبت به شوری آسیب‌پذیری بیشتری نشان می‌دهد (Singh *et al.,* 2014; Al-Tamimi *et al.,* 2023). در همین راستا، ارزیابی ژنوتیپ‌های در گونه گیاهی براسیکا نشان داده است که اعمال سطوح مختلف شوری (۵ تا ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر) می‌تواند باعث شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل در مرحله جوانه‌زنی شود (Baniaghil *et al.,* 2025).

از سوی دیگر، تنش آبی نیز از طریق کاهش پتانسیل آب و خاک، اثری مشابه شوری ایجاد می‌کند و می‌تواند توانایی جوانه‌زنی و رشد بذرها و گیاهچه‌ها را محدود کند. در شرایط طبیعی، این دو تنش اغلب به‌صورت هم‌زمان رخ می‌دهند؛ این موضوع به‌ویژه در ماسه‌زارها و اراضی ساحلی بسیار رایج است. در چنین شرایطی، تعامل شوری و کم‌آبی می‌تواند تفاوت‌های اکوتیپی در پاسخ گیاهان را آشکارتر کند و اهمیت بررسی هم‌زمان این دو عامل را افزایش دهد (Zerai *et al.,* 2010; Puccinelli *et al.,* 2024). از این‌رو، بررسی اثر ترکیبی شوری و کم‌آبی بر جوانه‌زنی و رشد اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا برای بهره‌برداری کشاورزی و همچنین بازتوانی بوم‌سازگان‌های شور اهمیت زیادی دارد (de la Reguera *et al.,* 2020; Akbarzadeh *et al.,* 2026).

مطالعات متعددی تا کنون نشان داده‌اند که با افزایش غلظت نمک به‌ویژه NaCl، درصد جوانه‌زنی به‌صورت وابسته به دوز نمک کاهش می‌یابد. با این‌حال، در بسیاری از گونه‌ها و اکوتیپ‌ها مشاهده شده است که پس از شست‌وشوی نمک جوانه‌زنی تا حد زیادی بازیابی می‌شود؛ به این معنی که بذور در شرایط شوری بالا جوانه نمی‌زنند، اما توان زیستی خود را حفظ می‌کنند و با کاهش شوری قادر به جوانه‌زنی می‌شوند (Qu *et al.,* 2007). میزان حساسیت و آستانه‌های بحرانی شوری بین گونه‌ها و حتی اکوتیپ‌های یک گونه متفاوت است؛ از سوی دیگر، کم‌آبی نیز عملکردی مشابه شوری دارد و با محدود کردن جذب آب توسط بذر، می‌تواند درصد و سرعت جوانه‌زنی را کاهش دهد. در برخی پژوهش‌ها، اثرات اسمزی از اثرات یونی تفکیک شده‌اند تا مشخص شود کدام بخش از پاسخ گیاه ناشی از سمیت یون‌ها و کدام مربوط به اثرات اسمزی است. به‌طور کلی، ترکیب شوری و کم‌آبی اغلب اثر منفی شدیدتری بر جوانه‌زنی و بقای گیاهچه‌ها نسبت به هر یک از این تنش‌ها به‌تنهایی ایجاد می‌کند (de la Reguera *et al.,* 2020).

برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اثرات شوری و کم‌آبی می‌توانند به‌صورت هم‌افزا یا غیرخطی بروز کنند؛ به‌گونه‌ای که سطحی از شوری که به‌تنهایی برای گیاه قابل تحمل است، در ترکیب با تنش آبی موجب کاهش قابل توجه جوانه‌زنی و رشد می‌شود. از سوی دیگر، در برخی گونه‌ها وجود شوری در سطوح معتدل حتی می‌تواند رشد را تقویت کند، اما با افزایش هم‌زمان شدت شوری و کم‌آبی، اثرات منفی به‌تدریج غالب می‌شوند. بر این اساس، انجام آزمایش‌های ترکیبی که گرادیان‌های شوری و پتانسیل آب را به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار دهند، برای درک دقیق‌تر پاسخ اکوتیپ‌ها ضروری است (Moghaddam *et al.,* 2023). در پژوهش‌های مربوط به تنش خشکی در گیاهان زراعی، به‌کارگیری سطوح مختلف ظرفیت زراعی (۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد) همراه با محاسبه شاخص‌های تحمل به خشکی، روشی متداول برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به‌شمار می‌رود. به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ای که روی لاین‌های یک گیاه زراعی انجام شد، شاخص‌هایی مانند GMP و MP توانستند به‌خوبی ژنوتیپ‌های متحمل را از ژنوتیپ‌های حساس تفکیک کنند (Neysi *et al.,* 2026).

مطالعات انجام شده درباره تنوع درون‌گونه‌ای سالیکورنیا نیز نشان داده‌اند که اکوتیپ‌ها و جمعیت‌های محلی این گیاه در برابر شوری و نیاز آبی پاسخ‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. از جمله مکانیسم‌های فیزیولوژیکی گزارش شده در این زمینه می‌توان به تنظیم جذب و توزیع یون‌های Na^+ و Cl^-، تجمع اسمولیت‌های سازگار و تقویت سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی اشاره

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

کرد (Fussy *et al.,* 2024). وجود چنین تنوعی نشان می‌دهد که انتخاب اکوتیپ مناسب برای کشت یا بازتوانی مستلزم انجام آزمون‌های محلی و تطبیقی است (Fussy *et al.,* 2024). در کنار این تفاوت‌های ژنتیکی، مدیریت کشاورزی نیز می‌تواند در کاهش اثرات منفی شوری و کم‌آبی نقش مهمی ایفا کند. برای مثال، انتخاب روش مناسب آبیاری، استفاده از محرک‌های رشد مانند GA3 و سیتوکینین، و نیز بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌های مفید ریزوسفر یا اندوفیت‌ها از جمله راهکارهای مؤثر در این زمینه هستند (Razzaghi Komaresofla *et al.,* 2019). از سوی دیگر، مدیریت آب و زهکش برای رشد بهینه ضروری است و آبشویی کنترل‌شده همراه با پایش EC خاک بهره‌وری اقتصادی را افزایش می‌دهد (Al-Tamimi *et al.,* 2023). مطالعات دیگری نیز نشان داده‌اند که استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد، مانند سیتوکینین و اکسین، می‌تواند نرخ باززایی اندام هوایی و رشد اولیه را در حضور شوری بهبود دهد، به عنوان مثال، بیشترین نرخ باززایی در ترکیب ۱۰۰ میلی‌مولار NaCl به‌همراه ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر هر یک از هورمون‌های سیتوکینین و اکسین حاصل شد (Mahmoudi & Danesh, 2019). این یافته‌ها برای تدوین پروتکل‌های کشت سالیکورنیا در شرایط مرزی از اهمیت زیادی برخوردارند.

در پژوهشی که روی سه نوع از گونه‌های سالیکورنیای ایرانی در اطراف دریاچه ارومیه انجام شد، نتایج نشان دادند که جمعیت گونه دیزج دول در تیمار شوری بالا در کنار مقدار مناسب هورمون بهترین شاخه‌زایی و ریشه‌زایی را نسب به دو گونه دیگر داشت (Gheytaranpour Sehrigh *et al.,* 2025). همچنین، اکبرزاده و همکاران (Akbarzadeh *et al.,* 2025) امکان کشت سالیکورنیا را در شرایط نیمه‌خشک و سرد در استان زنجان بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان دادند که انتخاب بستر مناسب برای کاشت به‌ویژه مخلوط ماسه‌بادی و کود دامی نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود جوانه‌زنی داشت. در میان اکوتیپ‌های بررسی‌شده، اکوتیپ بوشهر بهترین عملکرد را از نظر شاخص‌های جوانه‌زنی، سطح برگ و بیوماس خشک نشان داد. این یافته‌ها بر اهمیت تفاوت‌های اکوتیپی در سازگاری با شرایط ویژه اقلیمی و خاکی تأکید می‌کنند و نشان می‌دهند که انتخاب اکوتیپ مناسب برای مناطق خشک و نیمه‌خشک امری ضروری است. از سوی دیگر، فازی و همکاران (Fussy *et al.,* 2024) نشان داده‌اند برای آن‌که امکان مقایسه نتایج بین مطالعات مختلف فراهم شود، ضروری است که واحدهای شوری و نیز روش اعمال تنش کم‌آبی به‌طور صریح گزارش شوند زیرا هر یک از این روش‌ها می‌توانند اثرات متفاوتی ایجاد کنند. افزون بر درصد و نرخ جوانه‌زنی، اندازه‌گیری پارامترهای دیگری مانند زمان میانگین جوانه‌زنی، رشد ریشه و ساقه، محتوای کلروفیل، و نشانگرهای استرسی از جمله پروتئین‌های شوک حرارتی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز اهمیت دارد، زیرا این شاخص‌ها می‌توانند تصویر جامع‌تری از نحوه پاسخ گیاه ارائه دهند.

پژوهش‌های صورت گرفته در مجموع نشان می‌دهند که سالیکورنیا می‌تواند در آب‌های شور با EC تا ۶۰ dS/m و خاک‌های نامرغوب رشد نماید و طیف وسیعی از شوری را نیز می تواند تحمل کند. با این وجود، بهترین عملکرد آن در بازه ۵ تا ۲۵ dS/m مشاهده می‌شود و در برخی مطالعات حتی رشد مناسب تا ۴۰۰–۲۰۰ میلی‌مولار NaCl گزارش شده است (Glenn *et al.,* 1998; Ventura & Sagi, 2013; Puccinelli *et al.,* 2024; Lombardi *et al.,* 2022).

همچنین، قلمه‌گیری در گونه *S. europaea* موفق بود و ریشه‌زایی و تجمع زیست‌توده بهتر در محلول ۱/۵ درصد NaCl گزارش شده است (Koshida *et al.,* 2024). از سوی دیگر، گونه‌ها و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا، پاسخ‌های متفاوتی به شوری و شرایط آب دارند؛ برای مثال، اکوتیپ بوشهر در مقایسه با گونه بیگلوی، اکوتیپ‌های مرکزی و گرگان عملکرد بالاتری تحت آبیاری با آب دریا نشان داد (Ranjbar *et al.,* 2021). همچنین، زراعی و همکاران (Zerai *et al.,* 2010) و ایزدی و همکاران (Izadi *et al.,* 2024) نشان دادند که افزایش شوری آب آبیاری باعث کاهش وزن خشک علوفه در گونه بیگلوی شد، اما اکوتیپ بوشهر مقاومت بالاتری داشت. علاوه بر این، گونه *S. persica* جوانه‌زنی سریع و مقاومت زیادی نسبت به شوری و خشکی داشت (Darvishi *et al.,* 2013). باتوجه به آنچه بیان شد، می‌توان نتیجه گرفت که همیشه انتخاب اکوتیپ مناسب امری حیاتی است. برای نمونه، اکوتیپ‌های فلات مرکزی و ارومیه در شوری ۲۰–۱۰dS/m عملکرد علوفه‌ای و کیفیت تغذیه‌ای بهتری نسبت به اکوتیپ بوشهر دارند (Izadi *et al.,* 2025). در نهایت، شواهد موجود نشان می‌دهند که از طریق انتخاب اکوتیپ مناسب و مدیریت بستر می‌توان اثرات منفی شوری و کم‌آبی را کاهش داد.

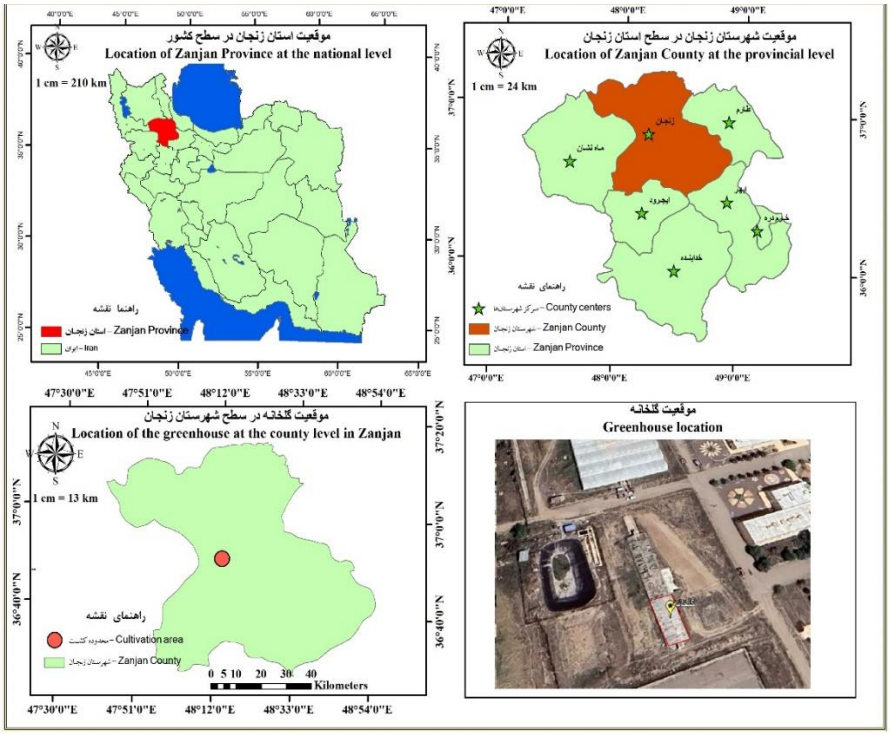
با توجه به محدودیت منابع آب و اراضی شور، این یافته‌ها اهمیت عملی بالایی برای توسعه کشاورزی پایدار و بهینه‌سازی کشت سالیکورنیا در ایران دارند. استان زنجان با اقلیم نیمه‌خشک سرد، میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و زمستان‌های سرد، همچنین روند افزایشی شوری منابع آبی همچون زنجان‌رود و قزل‌اوزن، بستر مناسبی برای بررسی کشت گیاهان شورزی است. هر چند که تاکنون پژوهش‌های مختلفی درباره تحمل شوری یا کم‌آبی سالیکورنیا انجام شده‌اند، اما مطالعات مربوط به اثر هم‌زمان این دو تنش بر جوانه‌زنی اکوتیپ‌های بومی ایران محدود هستند. بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر ترکیبی چهار سطح شوری آب آبیاری (آب معمولی حدود ۰٫۵، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر) و سه سطح ظرفیت زراعی (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد FC) بر درصد و سرعت جوانه‌زنی، رشد گیاهچه و پاسخ‌های فیزیولوژیکی سه اکوتیپ بومی سالیکورنیا (مرکزی، گرگان و بوشهر) در شرایط گلخانه‌ای زنجان بوده است. همچنین، شناسایی اکوتیپ مقاوم‌تر، تعیین آستانه‌های بحرانی تنش، ارائه الگوی مناسب مدیریت آبیاری و تهیه نقشه حرارتی پاسخ جوانه‌زنی از دیگر اهداف این پژوهش به‌شمار می‌روند.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مربوط به این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی استان زنجان (مختصات UTM: زون ۳۹، طول شرقی

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

۲۶۹۹۶۲ متر و عرض شمالی ۴۰۶۸۰۶۷۴ متر) به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شدند. استان زنجان دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد با زمستان‌های سرد، تابستان‌های نسبتاً گرم و خشک، میانگین بارندگی سالانه ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و دمای زیر صفر در زمستان (تا منفی ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد) است. با توجه به کاهش کیفیت منابع آبی و افزایش شوری رودخانه‌های زنجان‌رود و قزل‌اوزن، کشت گیاهان مقاوم به شوری مانند سالیکورنیا ضرورت دارد. گلخانه انتخابی امکان کنترل دقیق شوری و آبدهی و بررسی پاسخ اکوتیپ‌های مختلف را فراهم کرد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقه کشت در سطح کشور و استان
Figure 1. Location of the cultivation area at the national and provincial levels

در این پژوهش، از سه اکوتیپ سالیکورنیا (*S. persica*) شامل اکوتیپ‌های مرکزی (جمع‌آوری شده از فلات مرکزی)، گرگان (حاشیه دریای خزر) و بوشهر (سواحل خلیج‌فارس) استفاده شد. بذرها از رویشگاه‌های طبیعی جمع‌آوری و پیش از کشت، جهت یکنواختی اندازه و سالم‌بودن جداسازی شدند. به‌منظور ضدعفونی، بذرها به‌مدت ۵ دقیقه در محلول ۱ درصد هیپوکلریت سدیم قرار گرفتند و سپس با آب مقطر شست‌وشو شدند. در هر گلدان حدود ۵۰ بذر (معادل تقریباً ۰/۱ تا ۰/۱۳ گرم) کشت شدند.

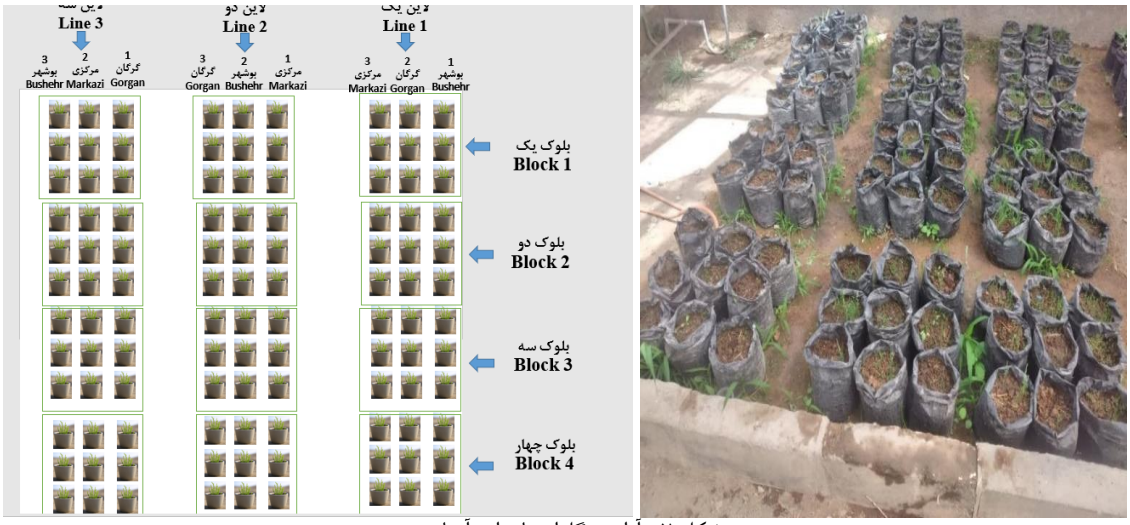
گلدان‌های مورد استفاده از جنس پلاستیک با ظرفیت ۵ کیلوگرم بودند. گلدان‌ها ابتدا با خاک خشک پر شدند و سپس وزن آن‌ها با خاک خشک و در حالت اشباع اندازه‌گیری شد. وزن اولیه گلدان‌ها در محدوده ۳۷۰۰ تا ۳۹۰۰ گرم و در حالت اشباع ۵۰۰۰ تا ۵۲۰۰ گرم بود. اختلاف این دو وزن، ظرفیت زراعی را نشان می‌دهد که برابر با ۱۳۰۰ گرم در نظر گرفته شد. در نتیجه، میزان آب مورد نیاز برای تیمارهای ۱۰۰ درصد (معادل ۱/۳ لیتر)، ۷۵ درصد (معادل ۰/۹۷۵ لیتر) و ۵۰ درصد (معادل ۰/۶۵۰ لیتر) تعیین گردید. خاک مورد استفاده ترکیبی از خاک لومی با ظرفیت زراعی ۱۳۰۰ گرم آب بود. آبیاری گلدان‌ها بر اساس سطح ظرفیت زراعی و میزان شوری مربوطه صورت گرفت و وزن گلدان‌ها قبل و بعد از آبیاری کنترل شد. جایگاه سطوح ظرفیت زراعی در هر بلوک به‌صورت تصادفی تعیین شد.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتور اول، شوری آب آبیاری، در چهار سطح شامل شاهد (آب معمولی با هدایت الکتریکی حدود ۰/۲- ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر)، ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد. فاکتور دوم ظرفیت زراعی گیاه، در سه سطح شامل ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (FC)، ۷۵ درصد و۵۰ درصد ظرفیت زراعی بود. آزمایش در سه لاین مجزا انجام شد که هر لاین شامل سه ردیف (هر ردیف مختص یک اکوتیپ) و در مجموع ۳۶ گلدان بود. هر لاین به چهار بلوک ۹ تایی تقسیم گردید که هر بلوک شامل سه ردیف (اکوتیپ‌ها) و در هر ردیف سه گلدان بود. به هر بلوک یک سطح شوری اختصاص داده شد: بلوک اول شاهد (آب معمولی)، بلوک دوم ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، بلوک سوم ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و بلوک چهارم ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر در هر بلوک. برای هر ردیف سه سطح ظرفیت زراعی اعمال گردید. به این ترتیب، هر ترکیب تیماری (شوری × ظرفیت زراعی) برای هر اکوتیپ سه تکرار داشت و در مجموع ۳۶ گلدان

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

برای هر اکوتیپ و ۱۰۸ گلدان برای کل آزمایش استفاده شدند (شکل ۲).

برای اعمال تیمار شوری، محلول‌های شور با حل کردن کلرید سدیم (NaCl) در آب مقطر تهیه و با استفاده از EC متر به مقادیر مورد نظر (۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر و آب معمولی) تنظیم شدند. برای دستیابی به هدایت الکتریکی مورد نظر در یک لیتر آب، مقادیر مشخصی از NaCl اضافه شدند: برای رسیدن به EC برابر با ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر حدود ۶/۴ گرم، برای ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر حدود ۱۹/۲ گرم و برای ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر حدود ۳۲ گرم نمک مورد نیاز بود. آبیاری روزانه بر اساس میزان تبخیر انجام شد.



شکل ۲- آرایش گلدان‌ها برای آزمایش
Figure 2. The layout of the pots for the experiment

آزمایش در شرایط گلخانه‌ای غیر کنترل‌شده از لحاظ دما اجرا شد. دمای هوا در طول دوره آزمایش ۱۴ روزه به‌صورت روزانه ثبت شد. میانگین دمای حداکثر در روز ۴۷/۹۶ ± ۲/۲۹ درجه سانتی‌گراد با بیشینه دمای ۵۲ درجه و میانگین دمای حداقل در شب ۲۱/۶۲ ± ۲/۲۹ درجه سانتی‌گراد با کمینه ۱۸ درجه بود. ضریب تغییرات دمای روزانه ۱۲/۸ درصد محاسبه شد. اگرچه این نوسانات بازتابی از شرایط واقعی منطقه زنجان در تابستان است، اما به‌دلیل نبود کنترل دما، نمی‌توان اثر آن را از اثر شوری و کم‌آبی جدا کرد. بنا بر این، در تفسیر نتایج باید اثر احتمالی تنش گرمایی را نیز در نظر گرفت (جدول ۱).

جدول ۱- دمای روزانه و شبانه در طول دوره ۱۴ روزه آزمایش (مقادیر نمونه)
Table 1. Daily and nightly temperatures during the 14-day experimental period (sample values)

میانگین روزانه (°C) Daily mean (°C)	حداقل دما (°C) Minimum temp. (°C)	حداکثر دما (°C) Maximum temp. (°C)	روز Day
32.5	19.8	45.2	1
34.9	22.1	47.8	2
36.8	24	49.5	3
36.8	23.5	50.1	4
34.7	21.2	48.2	5
33.3	20	46.5	6
31.7	18.5	44.8	7
32.6	19.2	45.9	8
35.4	22.8	48	9
37.8	24.5	51.2	10
38.5	25	52	11
36.4	23.1	49.8	12
34	21	47	13
31.8	18	45.5	14

جوانه‌زنی به‌مدت ۱۴ روز متوالی از روز دوم پس از کاشت، روزانه در ساعت ۹ صبح شمارش شد. زمانی که در بذری ریشه حداقل ۲ میلی‌متر ظاهر شد به عنوان جوانه‌زده در نظر گرفته شد. درصد جوانه‌زنی نهایی در روز ۱۴ محاسبه گردید. سرعت جوانه‌زنی (GRI) بر اساس فرمول Maguire محاسبه شد:
رابطه ۱:

$$GRI = \sum(n_i / t_i)$$

که در آن n_i تعداد بذر جوانه زده در روز i و t_i تعداد روز های پس از کاشت هستند. طول ریشه و ساقه گیاهچه‌ها پس از دوره جوانه‌زنی با خط‌کش میلی‌متری اندازه‌گیری شد.

جهت اندازه‌گیری شاخص‌های فیزیولوژیکی و استرسی، پرولین از نمونه‌های برگ تازه به‌روش باتس و همکاران (Bates *et al.*, 1973) استخراج و با اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. گلیسین‌بتائین به‌روش

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

Grieve & Grattan, 1983 با استفاده از معرف یدید پتاسیم بی‌اسمیت و اندازه‌گیری جذب در ۳۶۰ نانومتر تعیین گردید. فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) با مهار احیای نیتروبلوتترازولیوم (NBT) در طول موج ۵۶۰ نانومتر و فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) با اندازه‌گیری کاهش جذب پراکسید هیدروژن در ۲۴۰ نانومتر سنجش شد. مقدار پروتئین کل عصاره با روش برادفورد (Bradford, 1976) با استفاده از معرف برادفورد و اندازه‌گیری جذب در ۵۹۵ نانومتر تعیین گردید.

نقشه حرارتی (Heatmap) درصد جوانه‌زنی سه اکوتیپ تحت تأثیر شوری و ظرفیت زراعی با استفاده از زبان پایتون نسخه ۳/۱۱ طراحی شد تا الگوی پاسخ اکوتیپ‌ها به تنش‌های محیطی به‌صورت تصویری نمایش داده شود. تحلیل‌های آماری شامل تحلیل واریانس دوطرفه براساس رابطه (۲)، مدل رگرسیون خطی رابطه (۳)، تحلیل مولفه اصلی رابطه (۴) و آزمون تعقیبی توکی رابطه (۵) به شرح ذیل انجام شدند:

واریانس دوطرفه بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد:

رابطه ۲:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

که در آن

Y_{ijk} = مقدار مشاهده شده (درصد جوانه‌زنی) برای سطح i ام شوری، سطح j ام ظرفیت زراعی و تکرار k ام

μ = میانگین کل

α_i = اثر سطحi ام شوری

β_j = اثر سطحj ام ظرفیت زراعی

(αβ)_ij = اثر متقابل شوری و ظرفیت زراعی

ε_ijk = خطای تصادفی

مدل رگرسیون خطی نیز براساس رابطه (۳) محاسبه شد:

رابطه ۳:

$$Y^{\wedge} = \beta_0+\beta_1\,(EC)+\beta_2\,(FC)+\beta_3\,(EcotypeBushehr)+\beta_4\,(EcotypeGorgan)+\varepsilon$$

که در آن

Y: درصد جوانه‌زنی پیش‌بینی‌شده؛

β_0: عرض از مبدأ؛

β_1: ضریب مربوط به شوری (EC)؛

β_2: ضریب مربوط به ظرفیت زراعی (FC)؛

β_3 و β_4: ضرایب مربوط به اکوتیپ‌های بوشهر و گرگان، با در نظر گرفتن اکوتیپ مرکزی (Center) به‌عنوان گروه مبنا؛

ε: خطای تصادفی.

تحلیل مولفه‌های اصلی بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد:

رابطه ۴:

$$PC_k = a_{k1}X_1 + a_{k2}X_2 + \cdots + a_{kp}X_p$$

که در آن

PC_k: امتیاز مؤلفه kام

X_i: متغیر استانداردشده

a_ki: ضریب متغیر i در مؤلفه k

p: تعداد متغیرها

آزمون تعقیبی توکی از طریق رابطه (۵) محاسبه شد:

رابطه ۵:

$$HSD = q_{\alpha,\, p,\, df_error} \times \sqrt{(MSE / n)}$$

که در آن

HSD: حداقل اختلاف معنی‌دار

q: مقدار بحرانی دامنه دانشجویی

α: سطح معنی‌داری (0.05)

p: تعداد تیمارها

df_error: درجات آزادی خطا

MSE: میانگین مربعات خطا

n: تعداد تکرارها

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی اکوتیپ‌های سالیکورنیا در سطوح مختلف شوری و ظرفیت زراعی

درصد جوانه‌زنی سه اکوتیپ سالیکورنیا به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر هم‌زمان هدایت الکتریکی آب آبیاری و میزان آب در دسترس قرار گرفت. به‌طورکلی، افزایش شوری و کاهش آبیاری موجب کاهش جوانه‌زنی شد و اثر هم‌زمان کم‌آبی و شوری بالا بیشترین افت را ایجاد کرد. در این میان، اکوتیپ بوشهر مقاوم‌ترین، اکوتیپ مرکزی حساس‌ترین و اکوتیپ گرگان در حد متوسط قرار گرفتند.

در اکوتیپ بوشهر، در شرایط آبیاری کامل و آب معمولی بیشترین جوانه‌زنی (۹۵ درصد) ثبت شد که با افزایش شوری به‌ترتیب به ۸۵، ۵۰ و ۲۵ درصد در سطوح ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یافت. با کاهش آبیاری به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، درصد جوانه‌زنی به‌ترتیب در شرایط بدون شوری به ۸۵ و ۷۰ درصد رسید و در شوری ۵۰ دسی‌زیمنس به ۲۰ و ۱۵ درصد افت کرد.

در اکوتیپ گرگان، جوانه‌زنی نسبت به بوشهر کاهش بیشتری داشت، به‌طوری‌که در آبیاری کامل از ۸۵ درصد در آب معمولی به ۶۰، ۳۵ و حدود ۱۵ درصد در سطوح ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی زیمنس رسید. در شرایط کم‌آبی (۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) درصد جوانه‌زنی در شوری ۵۰ دسی زیمنس به‌ترتیب ۱۰ و ۸ درصد ثبت شد.

اکوتیپ مرکزی بیشترین حساسیت را نشان داد. در آبیاری کامل، درصد جوانه‌زنی از حدود ۸۵ درصد در آب معمولی به ۵۹، ۲۵ و ۱۵ درصد در سطوح ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس کاهش یافت. با کاهش آبیاری به ۷۵ درصد، جوانه‌زنی در شوری ۵۰ دسی‌زیمنس به ۱۰ درصد رسید و در آبیاری ۵۰ درصد تقریباً به صفر کاهش یافت.

به‌طورکلی، اثر ترکیبی کم‌آبی و شوری بالا نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش جوانه‌زنی داشت. اکوتیپ بوشهر در شرایط نامساعد بیشترین مقاومت را حفظ کرد و همچنان درصدی از جوانه‌زنی را نشان داد، درحالی‌که اکوتیپ مرکزی به‌شدت افت داشت و گرگان در حد متوسط باقی ماند. بنا بر این، برای کشت در مناطق نیمه‌خشک با شوری نسبتاً بالا، اکوتیپ بوشهر گزینه مناسب‌تری است، در حالی که استفاده از اکوتیپ‌های گرگان و مرکزی نیازمند مدیریت دقیق آبیاری و انتخاب شرایط محیطی بهینه خواهد بود (جدول ۲).

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

جدول ۲- میانگین و انحراف معیار درصد جوانه‌زنی اکوتیپ‌های سالیکورنیا

Table 2. Mean and standard deviation values of germination percentages in *Salicornia* ecotypes

اکوتیپ Ecotype	ظرفیت زراعی (درصد) Field Capacity (%)	EC 0 (میانگین درصد جوانه‌زنی± انحراف معیار) EC 0 (Mean Germination% ± SD)	EC 10 (میانگین درصد جوانه‌زنی± انحراف معیار) EC 10 (Mean Germination% ± SD)	EC 30 (میانگین درصد جوانه‌زنی± انحراف معیار) EC 30 (Mean Germination% ± SD)	EC 50 (میانگین درصد جوانه‌زنی± انحراف معیار) EC 50 (Mean Germination% ± SD)
بوشهر Bushehr	100	95 ± 2.31	85 ± 4.16	50 ± 1.73	25 ± 2.31
	75	85 ± 2.00	75 ± 2.52	40 ± 2.00	20 ± 2.00
	50	70 ± 2.00	60 ± 3.00	30 ± 2.00	15 ± 2.00
گرگان Gorgan	100	85 ± 1.73	60 ± 3.00	35 ± 2.00	14.67 ± 1.53
	75	75 ± 2.00	55 ± 2.00	29.67 ± 1.53	10 ± 1.00
	50	60 ± 2.00	45 ± 2.00	25 ± 2.00	8.33 ± 1.53
مرکزی Markazi	100	84.67 ± 2.52	59.33 ± 2.08	24.67 ± 1.53	14.67 ± 1.53
	75	70 ± 2.00	55 ± 2.00	20 ± 2.00	10 ± 2.00
	50	55 ± 2.00	45 ± 2.00	15 ± 2.00	8 ± 2.00

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

شکل ۳ میزان جوانه‌زنی اکوتیپ مرکزی سالیکورنیا را تحت دو سطح شوری متفاوت در شرایط کاهش ظرفیت زراعی ۷۵ درصد نشان می‌دهد. در سمت راست شکل، جوانه‌زنی ۲۰ درصد مشاهده می‌شود که مربوط به شوری ۳۰ دسی‌زیمنس است، درحالی‌که در سمت چپ، همان اکوتیپ با همان سطح ظرفیت زراعی اما با شوری ۵۰ دسی زیمنس، درصد جوانه‌زنی به ۱۰ درصد کاهش یافته است و از طرفی رشد جوانه‌ها هم به نسبت کاهش یافته است. این تصویر نشان می‌دهد که افزایش شوری تأثیر منفی قابل‌توجهی بر جوانه‌زنی حتی در شرایط مشابه تأمین آب دارد.

شکل ۴ تغییرات درصد جوانه‌زنی اکوتیپ بوشهر را در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) نشان می‌دهد. در تیمار آب معمولی (سمت راست)، حدود ۹۵ درصد از بذرها جوانه زدند که بیانگر شرایط بهینه برای این اکوتیپ است. درحالی‌که در همان شرایط آبیاری، اما با افزایش شوری به ۱۰ دسی‌زیمنس (سمت چپ)، درصد جوانه‌زنی به حدود ۸۵ درصد کاهش یافت. این مقایسه بیانگر اثر منفی شوری حتی در سطوح پایین‌بر توان جوانه‌زنی بذرهای سالیکورنیا در اکوتیپ بوشهر است.



شکل ۳- جوانه‌زنی ۲۰ درصدی اکوتیپ مرکزی با شوری ۳۰ دسی‌زیمنس و ظرفیت زراعی ۷۵ درصد (سمت راست) و جوانی‌زنی همان گونه با همان نیاز ۷۵ درصد اما با شوری ۵۰ دسی‌زیمنس و درصد جوانه‌زنی ۱۰ درصد (سمت چپ)
Figure 3. 20% germination of the Central ecotype at 30 dS/m salinity and 75% field capacity (right) and the germination of the same ecotype at 50 dS/m salinity with 75% field capacity, showing 10% germination (left)



شکل ۴- جوانه‌زنی ۹۵ درصدی اکوتیپ بوشهر با آب معمولی و ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد (سمت راست) و جوانی‌زنی همان گونه با همان نیاز آبی ۱۰۰ درصد اما با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس و درصد جوانه‌زنی ۸۵ درصد کاهش یافت (سمت چپ)
Figure 4. 95% germination of the Bushehr ecotype with normal water and 100% field capacity (right) and the germination of the same ecotype with 100% field capacity but 10 dS/m salinity, showing a reduced germination of 85% (left)

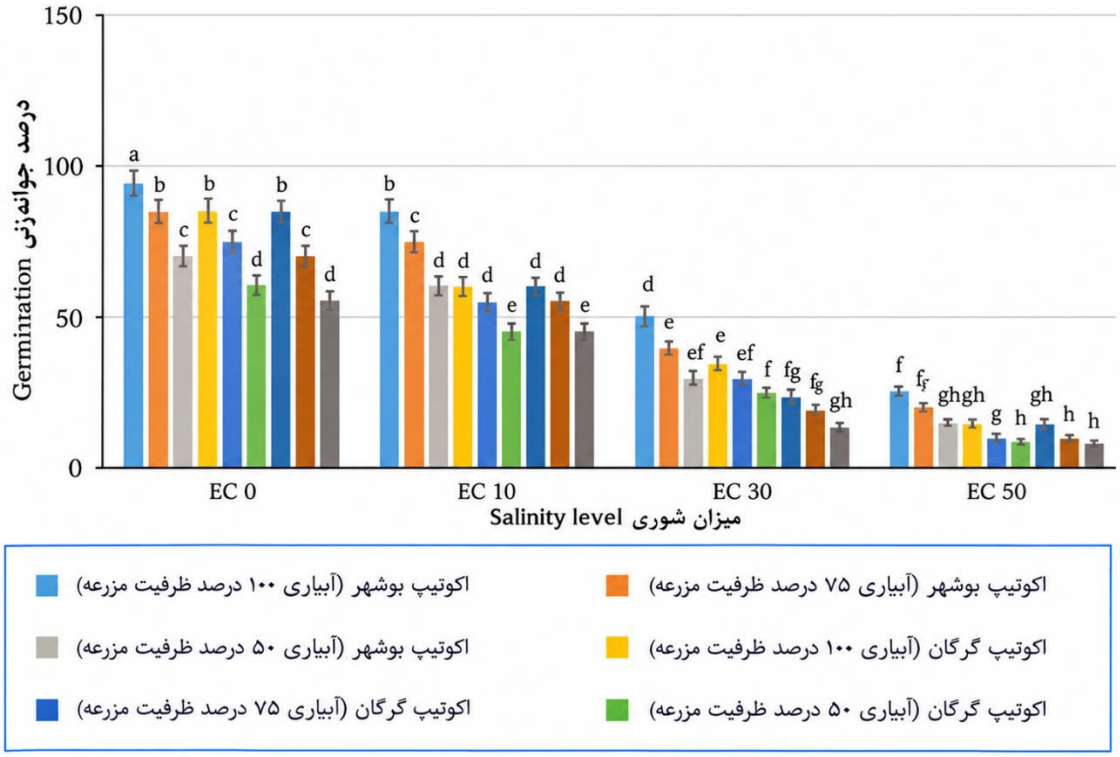
تأثیر تیمار شوری در ارتباط با ظرفیت زراعی بر میزان جوانه‌زنی اکوتیپ های سه‌گانه

هم شوری آب و هم کاهش ظرفیت زراعی به‌طور هم‌زمان بر درصد جوانه‌زنی سه اکوتیپ سالیکورنیا تأثیر قابل توجهی داشتند. در شرایط تأمین کامل آب (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، افزایش شوری باعث کاهش قابل توجه جوانه‌زنی شد، هرچند که اکوتیپ بوشهر همچنان بیشترین مقاومت را نشان داد. با کاهش سطح آبیاری به ۷۵ درصد و ۵۰ درصد، اثر منفی شوری بر جوانه‌زنی تشدید شد، به‌طوری‌که درصد جوانه‌زنی در هر سطح شوری نسبت به شرایط آبیاری کامل کاهش یافت.

این یافته‌ها اهمیت تأمین آب کافی در مراحل اولیه جوانه‌زنی و انتخاب اکوتیپ‌های مقاوم برای کشت در شرایط شور و کم‌آب را برجسته می‌کنند (شکل ۵). شکل ۵ درصد جوانه‌زنی سه اکوتیپ سالیکورنیای ایرانی (*S. persica*) شامل اکوتیپ‌های بوشهر، گرگان و مرکزی در سطوح مختلف شوری ۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر) و سطوح مختلف نیاز آبی (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) را نشان می‌دهد. نوارهای خطا نشان‌دهنده انحراف معیار (n=3) هستند. حروف کوچک لاتین (a, b, c, d, e, f, g, & h) روی هر ستون، بر اساس آزمون توکی (Tukey HSD) در سطح معنی‌داری ۰/۰۵، گروه‌های همگن را نشان می‌دهند. ستون‌هایی که حروف مشترکی دارند (مانند هر دو «a») تفاوت معنی‌داری ندارند، در حالی‌که ستون‌هایی با حروف متفاوت مثلاً «a و b»، اختلاف معنی‌دار نشان می‌دهند. حروف مرکب مانند «fg» بیانگر آن هستند که آن ستون با هر دو گروه «f» و «g» همگن است و تفاوت معنی‌داری ندارد. به‌طور کلی، روند کاهش جوانه‌زنی با افزایش

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

شوری و کاهش تأمین آب هم‌زمان منطقی و تدریجی بود و نشان داد که اکوتیپ بوشهر مقاوم‌ترین، اکوتیپ گرگان متوسط و اکوتیپ مرکزی حساس‌ترین نسبت به تنش‌های شوری و کم‌آبی بودند. به عبارت دیگر، با افزایش شوری و کاهش میزان آب، درصد جوانه‌زنی در هر سه اکوتیپ به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، اما شدت کاهش در اکوتیپ بوشهر کمتر از دو اکوتیپ دیگر بود.



شکل ۵- تأثیر تیمار شوری در ارتباط با ظرفیت زراعی بر میزان جوانه‌زنی اکوتیپ های سه‌گانه
Figure 5. Effects of salinity treatment in relation to water requirement on the germination percentages of the three *Salicornia persica* ecotypes

نتایج تحلیل واریانس دوطرفه (Two-Way ANOVA)

برای بررسی اثرات شوری آب، میزان ظرفیت زراعی و تعامل آن‌ها بر درصد جوانه‌زنی سه اکوتیپ سالیکورنیا، تحلیل واریانس دوطرفه (Two-Way ANOVA) انجام شد. نتایج این تحلیل (جدول ۳) نشان می‌دهند که هر دو عامل شوری و ظرفیت زراعی به‌طور مستقل و همچنین اثر متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌دار آماری ($P < 0.001$) بر جوانه‌زنی دارند.

به‌طورکلی، یافته‌های ANOVA نشان می‌دهند که مدیریت هم‌زمان شوری و آبیاری برای دستیابی به حداکثر جوانه‌زنی ضروری است و انتخاب اکوتیپ مقاوم، به‌ویژه در شرایط نیمه‌خشک و شور، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر موفقیت کشت داشته باشد.

جدول ۳- نتایج تحلیل واریانس دوطرفه
Table 3. Two-way ANOVA results

منبع تغییرات Source of Variation	درجات آزادی Degrees of Freedom (df)	مجموع مجذورات Sum of Squares (SS)	میانگین مجذورات Mean Squares (MS)	مقدار F F-value	سطح احتمال *P-value*
شوری (Salinity)	3	12345.33	4115.11	150.25	< 0.001
ظرفیت زراعی (Water Requirement)	2	6789.11	3394.56	123.89	< 0.001
اثر متقابل (Interaction)	6	2345.67	390.94	14.27	< 0.001
خطا (Error)	18	492.67	27.37	-	-
کل (Total)	29	19572.78	-	-	-

نتایج آزمون تعقیبی توکی (Tukey's HSD)

آزمون تعقیبی توکی برای مقایسه زوجی میان سطوح مختلف شوری و ظرفیت زراعی انجام شد تا تفاوت‌های معنی‌دار بین آن‌ها شناسایی شوند. نتایج این آزمون نشان دادند که تمامی سطوح شوری (آب معمولی، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر) و تمامی سطوح ظرفیت زراعی (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

ظرفیت زراعی) به‌طور معنی‌داری با یکدیگر متفاوت بودند ($P < 0.001$). به‌طور خاص، افزایش شوری از آب معمولی به ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس باعث کاهش قابل توجه درصد جوانه‌زنی شد، به‌طوری‌که تفاوت میانگین آن‌ها به‌ترتیب ۲۵/۳۳، ۵۰/۶۷ و ۶۵/۳۳ درصد بود. همچنین، کاهش میزان آب از ۱۰۰ درصد به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز موجب کاهش معنی‌دار جوانه‌زنی شد. این نتایج تأکید می‌کنند که اکوتیپ بوشهر در شرایط شوری بالا و تأمین کامل آب نسبت به سایر اکوتیپ‌ها مقاومت بیشتری دارد و برتری آن در جوانه‌زنی تحت شرایط تنش‌های شوری و کم‌آبی را تأیید می‌کند (جدول ۴).

جدول ۴- نتایج آزمون تعقیبی توکی

Table 4. Results of Tukey's HSD post-hoc test

مقایسه Comparison	تفاوت میانگین Mean Difference	سطح احتمال *P-value*	معنی‌داری Significance
مقایسه هدایت الکتریکی ۰ با ۱۰ EC 0 vs EC 10	25.33	< 0.001	*
مقایسه هدایت الکتریکی ۰ با ۳۰ EC 0 vs EC 30	50.67	< 0.001	*
مقایسه هدایت الکتریکی ۰ با ۵۰ EC 0 vs EC 50	65.33	< 0.001	*
مقایسه نیاز آبی ۱۰۰ درصد با ۷۵ درصد 100% vs 75%	15.11	< 0.001	*
مقایسه نیاز آبی ۱۰۰ درصد با ۵۰ درصد 100% vs 50%	30.22	< 0.001	*

*تمام مقایسه‌ها در سطح معنی‌داری $P < 0.05$ معنی‌دار هستند که با علامت (*) معنی‌داری نشان داده شده است.
*All comparisons are significant at the p < 0.05 level, and significance is indicated by an asterisk.

تحلیل رگرسیون خطی و اثر اکوتیپ‌ها

برای بررسی تأثیر شوری، سطح آب و اکوتیپ‌ها بر درصد جوانه‌زنی، مدل رگرسیون خطی ساخته شد. نتایج نشان می‌دهند که شوری اثر منفی و معنی‌داری بر جوانه‌زنی دارد، به‌طوری‌که هر واحد افزایش شوری، حدود ۱/۲۷ درصد کاهش جوانه‌زنی را به‌دنبال دارد. در مقابل، سطح آب اثر مثبت دارد و هر درصد افزایش رطوبت خاک، ۰/۳۴ درصد افزایش جوانه‌زنی را سبب می‌شود. از نظر اکوتیپ، بوشهر بالاترین ضریب مثبت را دارد که نشان دهنده عملکرد بسیار خوب آن است، گرگان ضریب مثبت متوسط دارد و ضریب منفی مرکزی نشان می‌دهد که عملکرد آن پایین‌تر است و ازنظر آماری معنی‌دار نیست. این نتایج تأکید می‌کنند که گرگان در میان اکوتیپ‌ها، عملکرد متوسط دارد و می‌تواند در شرایط شوری و کم‌آبی متوسط عملکرد قابل قبولی ارائه دهد (جدول ۵).

جدول ۵- نتایج رگرسیون خطی برای درصد جوانه‌زنی

Table 5. Linear regression results for germination percentage

متغیر Variable	ضریب (β) Coefficient (β)	خطای استاندارد Standard Error	مقدار T t-value	سطح معنی‌داری *P-value*
ثابت Constant	48.32	3.85	12.55	<0.001
شوری (dS/m) Salinity (dS/m)	-1.27	0.05	-26.12	<0.001
آب (FC٪) Water (%FC)	0.34	0.05	7.52	<0.001
اکوتیپ بوشهر Bushehr Ecotype	15.45	2.3	6.72	<0.001
اکوتیپ گرگان Gorgan Ecotype	3.2	2.3	1.39	0.042
اکوتیپ مرکزی Markazi Ecotype	-1.94	2.3	-0.84	0.162

تحلیل اجزای اصلی (PCA)

نتایج تحلیل اجزای اصلی (PCA) نشان دادند که مؤلفه اول (PC1) با توضیح ۶۴/۹ درصد از واریانس کل، بیشترین نقش را در تبیین تغییرات داده‌ها داشت. این مؤلفه عمدتاً تحت تأثیر درصد جوانه‌زنی و شوری قرار گرفت، به‌گونه‌ای که درصد جوانه‌زنی با PC1 همبستگی مثبت و شوری با آن رابطه منفی نشان داد؛ بنا بر این، می‌توان گفت که PC1 نمایانگر تضاد بین شرایط جوانه‌زنی مطلوب و اثرات منفی شوری است. مؤلفه دوم (PC2) که ۳۳/۳ درصد از واریانس را توضیح می‌دهد، بیشتر با میزان آب در دسترس ارتباط دارد و بار عاملی بالای آن با سطح آب نشان می‌دهد که تغییرات این مؤلفه اساساً بیانگر اثر رطوبت خاک بر جوانه‌زنی هستند. بر اساس پراکنش اکوتیپ‌ها در فضای دو مؤلفه، اکوتیپ بوشهر در محدوده‌ای قرار گرفت که با جوانه‌زنی بالا و حساسیت کمتر به شوری همراه بود و در نتیجه بهترین عملکرد را نشان داد. در مقابل، اکوتیپ مرکزی در جهتی قرار گرفت که با شوری بالا و درصد جوانه‌زنی پایین مرتبط بود و بنا بر این، ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. اکوتیپ گرگان نیز در حدفاصل این دو اکوتیپ قرار گرفت و الگوی پاسخ آن بیانگر توان متوسط و تعادلی در شرایط مختلف شوری و کم‌آبی بود. این نتایج به‌خوبی با داده‌های تجربی مشاهده شده مطابقت دارند و نشان می‌دهند که تحلیل اجزای اصلی ابزاری مؤثر برای تبیین سازگاری اکوتیپ‌ها در شرایط تنش محیطی است (جدول ۶).

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

جدول ۶- نتایج PCA برای درصد جوانه‌زنی و عوامل محیطی
Table 6. PCA results for the germination percentage and environmental factors

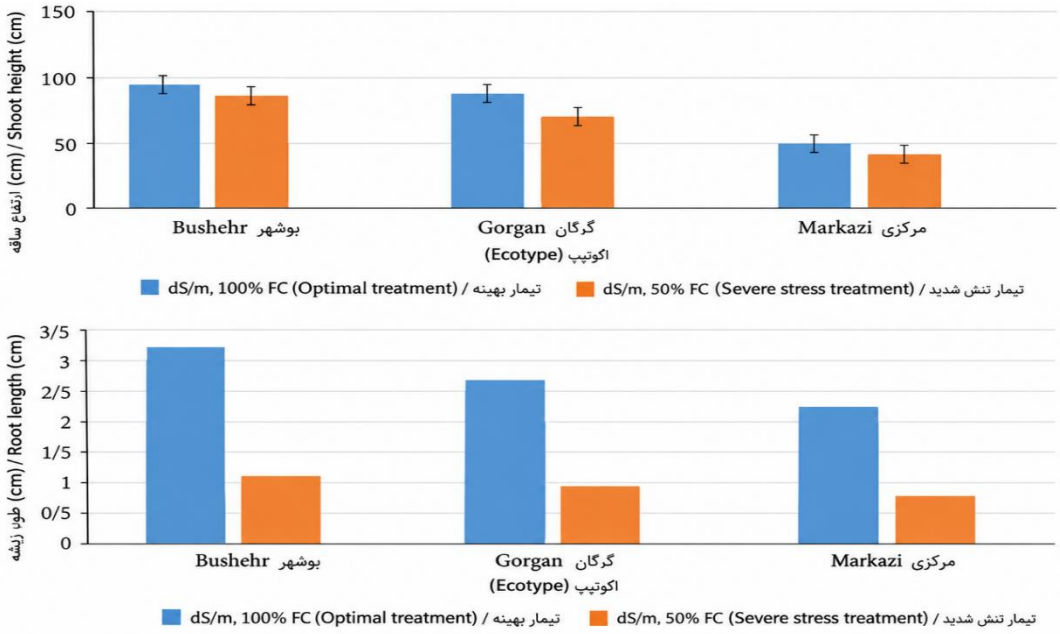
متغیر Variable	مؤلفه اصلی اول (۶۴/۹) PC1 (64.9%)	مؤلفه اصلی دوم (۳۳/۳) PC2 (33.3%)
درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	0.707	0
شوری (dS/m) Salinity (dS/m)	-0.68	0.276
Water (%FC) آب (FC٪)	0.195	0.961

پارامترهای فیزیولوژیکی و استرسی

بررسی پارامترهای فیزیولوژیکی (سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه و ساقه) و شاخص‌های استرس (پرولین، گلیسین‌بتائین، SOD وCAT) در سه اکوتیپ سالیکورنیا تفاوت‌های آشکاری را میان اکوتیپ‌ها نشان داد (جدول ۷). در شرایط بدون استرس (آب معمولی و آبیاری کامل)، اکوتیپ بوشهر بالاترین مقادیر سرعت جوانه‌زنی (day^{-1} ۴/۵)، طول ریشه (۳/۲ سانتی‌متر) و طول ساقه (۲/۸ سانتی‌متر) را داشت، درحالی‌که اکوتیپ مرکزی پایین‌ترین مقادیر را نشان داد. گرگان در تمام شاخص‌ها بین این دو اکوتیپ قرار گرفت. در شرایط استرس شدید (۵۰ دسی‌زیمنس شوری و ۵۰ درصد آبیاری)، همه پارامترهای رشدی در هر سه اکوتیپ به‌طور قابل توجهی کاهش یافتند. در شرایط بهینه (مرحله جوانه‌زنی)، اکوتیپ بوشهر به‌طور معنی‌داری دارای بیشترین طول ریشه (۳/۲ سانتی‌متر) و ارتفاع ساقه (۲/۸ سانتی‌متر) نسبت به گرگان (ریشه: ۲/۷۲، ساقه: ۲/۳۸) و مرکزی (ریشه: ۲/۲۴، ساقه: ۱/۹۶) بود. این برتری نشان‌دهنده پتانسیل رشد ذاتی بالاتر بوشهر در شرایط بدون تنش است. در تیمار تنش شدید، طول ریشه و ارتفاع ساقه در هر سه اکوتیپ به‌شدت کاهش یافت (حدود ۶۵ تا ۶۸ درصد کاهش در همه اکوتیپ‌ها). با این‌حال، مقادیر مطلق طول ریشه و ساقه در بوشهر (ریشه: ۱/۱، ساقه: ۰/۹ سانتی‌متر) همچنان بالاتر از گرگان (ریشه: ۰/۹۴، ساقه: ۰/۷۷) و مرکزی (ریشه: ۰/۷۷، ساقه: ۰/۶۳) باقی ماندند. توانایی بهتر بوشهر در حفظ رشد رویشی، حتی با وجود درصد کاهش مشابه، احتمالاً به کارایی بیشتر در جذب آب و مواد معدنی، تجمع اسمولیت‌های سازگار (پرولین و گلیسین‌بتائین) و فعال‌سازی قوی‌تر سیستم آنتی‌اکسیدانی (SOD و CAT) مرتبط است که در جدول ۷ گزارش شده است. این یافته‌ها تأکید می‌کند که اکوتیپ بوشهر نه‌تنها در مرحله جوانه‌زنی، بلکه در مراحل اولیه رشد گیاهچه نیز تحمل بیشتری به تنش ترکیبی شوری و کم‌آبی دارد و از این نظر کاندیدای مناسبی برای کشت در خاک‌های شور و مناطق با محدودیت آب است (شکل ۶). از نظر متابولیسم‌های سازگار، پرولین و گلیسین بتائین تحت شرایط استرس افزایش چشم‌گیری داشتند. در اکوتیپ بوشهر، غلظت پرولین از ۵ به ۱۵ و گلیسین‌بتائین از ۶ به ۱۸ µmol/g FW رسید که بیانگر توان بالای این اکوتیپ در فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی است. در گرگان، این افزایش به ۱۲/۷۵ و ۱۵/۳ و در مرکزی به ۱۰/۵ و ۱۲/۶ رسید. به‌عبارت دیگر، میزان انباشت این ترکیبات در بوشهر بالاتر از دو اکوتیپ دیگر بود.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز با افزایش استرس بالا رفت. فعالیت SOD و CAT در بوشهر به‌ترتیب از ۱۰۰ و ۸۰ به ۱۲۰ و ۱۰۰ رسید، در گرگان از ۸۵ و ۶۸ به ۱۰۲ و ۸۵ و در مرکزی از ۷۰ و ۵۶ به ۸۴ و ۷۰ افزایش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که هر سه اکوتیپ برای مقابله با استرس مکانیزم‌های آنتی‌اکسیدانی را فعال کردند، اما شدت پاسخ در بوشهر بیشتر و مؤثرتر بود. به‌طورکلی، اکوتیپ بوشهر بیشترین کارایی فیزیولوژیکی و بالاترین توان دفاعی را در برابر تنش‌های ترکیبی شوری و کم‌آبی دارد، درحالی‌که اکوتیپ مرکزی ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد و اکوتیپ گرگان در سطح متوسط باقی ماند. این یافته‌ها مؤید آن هستند که بوشهر گزینه مناسبی برای کشت در مناطق شور و خشک محسوب می‌شود، درحالی‌که کشت اکوتیپ‌های مرکزی و گرگان نیازمند شرایط مدیریتی دقیق‌تر خواهد بود (جدول ۷).

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]



شکل ۶- مقایسه طول ریشه (پنل چپ) و ارتفاع ساقه (پنل راست) در سه اکوتیپ سالیکورنیا (بوشهر، گرگان، و مرکزی) تحت دو تیمار: بهینه (آب معمولی، آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و تنش شدید (شوری ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر، آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی). نوارهای خطا نشان‌دهنده انحراف معیار هستند.

Figure 6. Comparison of root length (left panel) and shoot height (right panel) in three *Salicornia* ecotypes (Bushehr, Gorgan, & Markazi) under two treatments: optimal (tap water, 100% field capacity) and severe (50 dS/m salinity, 50% field capacity) stress levels. Error bars represent standard deviation.

جدول ۷- پارامترهای فیزیولوژیکی و استرسی در سه اکوتیپ

Table 7. Physiological and stress-related parameters in three ecotypes

فعالیت آنزیم کاتالاز CAT (U/mg)	فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز SOD (U/mg)	گلیسین‌بتائین (µmol/g FW) Glycine Betaine (µmol/g FW)	پرولین (µmol/g FW) Proline (µmol/g FW)	طول ساقه (cm) Shoot length (cm)	طول ریشه (cm) Root length (cm)	سرعت جوانه‌زنی GRI (day^{-1})	تیمار (شوری، آب) Treatment (Salinity, Water)	اکوتیپ Ecotype
80	100	6	5	2.8	3.2	4.5	0.5 dS/m,100%	بوشهر Bushehr
100	120	18	15	0.9	1.1	2.1	50 dS/m,50%	
68	85	5.1	4.25	2.38	2.72	3.82	0.5 dS/m,100%	گرگان Gorgan
85	102	15.3	12.75	0.77	0.94	1.78	50 dS/m,50%	
56	70	4.2	3.5	1.96	2.24	3.15	0.5 dS/m,100%	مرکزی Markazi
70	84	12.6	10.5	0.63	0.77	1.47	50 dS/m,50%	

پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی با مدل رگرسیون

نتایج مدل رگرسیون خطی برای پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی نشان می‌دهند که این مدل توانایی مناسبی در شبیه‌سازی رفتار اکوتیپ‌ها تحت شرایط مختلف شوری و رطوبت دارد. مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده (برای ۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس) حاکی از آن است که بین داده‌های واقعی و مقادیر برآوردی تطابق نسبتاً بالایی وجود دارد. در این میان، اکوتیپ گرگان الگوی میانه‌روی خود را به‌خوبی نشان داد و در تمامی سطوح شوری، درصد جوانه‌زنی آن نزدیک به مقادیر پیش‌بینی‌شده قرار گرفت. اکوتیپ مرکزی در سطح شوری پایین عملکردی نسبتاً مشابه پیش‌بینی‌ها داشت، اما با افزایش شوری از سطح ۴۰ به ۶۰ دسی‌زیمنس بر متر، اختلاف آن با مدل آشکار شد و به صفر رسید. این وضعیت می‌تواند ناشی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی خاص یا محدودیت‌های محیطی باشد که موجب کاهش شدید جوانه‌زنی این اکوتیپ شده است. در مقابل، بوشهر در تمامی سطوح شوری بالاترین درصد جوانه‌زنی را داشت و مقادیر آن به‌خوبی با داده‌های پیش‌بینی‌شده منطبق بودند. این موضوع نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی توانسته است تفاوت‌های عملکردی میان اکوتیپ‌ها را به‌طور دقیق بازتاب دهد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی واکنش اکوتیپ‌ها در شرایط تنش شوری و رطوبت مورد استفاده قرار گیرد. (جدول ۸).

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

جدول ۸- پیش‌بینی و مشاهده درصد جوانه‌زنی در اکوتیپ‌ها

Table 8. Predicted and observed germination percentages in the ecotypes

اکوتیپ Ecotype	شوری (dS/m) Salinity (dS/m)	Water (%FC) آب (FC٪)	جوانه‌زنی پیش‌بینی‌شده (درصد) Predicted Germination (%)
بوشهر Bushehr	20	80	70.57
	40	80	40.17
	60	80	14.77
گرگان Gorgan	20	80	53.32
	40	80	27.92
	60	80	2.52
مرکزی Markazi	20	80	48.18
	40	80	22.78
	60	80	0 (محدودشده)

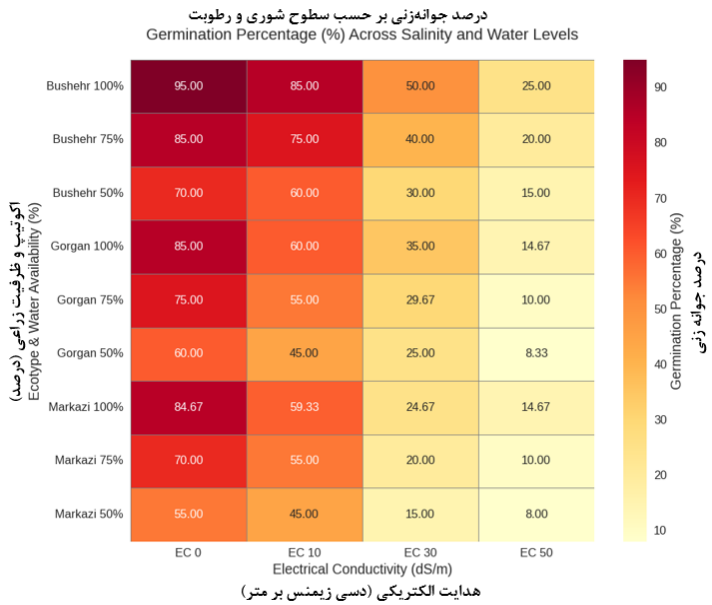
بررسی و تحلیل نقشه حرارتی (heatmap) درصد جوانه‌زنی در سه اکوتیپ مختلف سالیکورنیا

درصد جوانه‌زنی سه اکوتیپ سالیکورنیا (بوشهر، گرگان و مرکزی) تحت تأثیر هم‌زمان سطوح مختلف هدایت الکتریکی آب آبیاری EC 0، EC 10، EC 30 و EC 50 دسی‌زیمنس بر متر) و میزان دسترسی به آب (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای) به‌طور قابل توجهی تغییر یافت. همان‌گونه که در نمودار حرارتی (شکل ۷) مشاهده می‌شود، با افزایش شوری آب و کاهش میزان آبیاری، درصد جوانه‌زنی به‌صورت پیوسته و شدید کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که اثر ترکیبی این دو عامل استرس‌زا، افت هم‌افزایی در عملکرد جوانه‌زنی ایجاد می‌کند. در شرایط آبیاری کامل و آب شیرین (EC 0)، بالاترین میزان جوانه‌زنی متعلق به اکوتیپ بوشهر با ۹۵ درصد بود، در حالی‌که اکوتیپ‌های گرگان و مرکزی به‌ترتیب ۸۵ و ۸۴/۶۷ درصد جوانه‌زنی داشتند. با افزایش هدایت الکتریکی به ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر در همین سطح آبیاری، این مقادیر به‌ترتیب به ۲۵، ۱۴/۶۷ و ۱۴/۶۷ درصد کاهش یافتند که نشان‌دهنده حساسیت بالای مرحله جوانه‌زنی به استرس اسمزی و یونی است.

کاهش دسترسی به آب از ۱۰۰ به ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای، اثر منفی شوری را تشدید کرد. در شرایط EC 50 و آبیاری ۵۰ درصد، جوانه‌زنی در اکوتیپ بوشهر به ۱۵ درصد رسید، درحالی‌که در گرگان و مرکزی به‌ترتیب به ۸/۳۳ و ۸ درصد کاهش یافت. این الگو در نمودار حرارتی به‌وضوح قابل مشاهده است و بیانگر وجود آستانه تحمل متفاوت در اکوتیپ‌ها در برابر استرس ترکیبی است. اکوتیپ بوشهر در تمام ترکیب‌های استرس‌زا، بالاترین درصد جوانه‌زنی را حفظ کرد و حتی در شدیدترین شرایط نیز عملکرد قابل قبولی از خود نشان داد که احتمالاً ناشی از سازگاری‌های فیزیولوژیکی و ژنتیکی پیشرفته نظیر تنظیم اسمزی مؤثر، تجمع سازگارهای اسمزی و یا بیان ژن‌های مقاوم به شوری در مرحله اولیه رشد است. در مقابل، اکوتیپ مرکزی حساس‌ترین پاسخ را به استرس نشان داد و در سطوح متوسط شوری (EC 30) نیز کاهش شدیدی در جوانه‌زنی داشت (۲۴/۶۷ درصد در آبیاری کامل). اکوتیپ گرگان عملکردی میانه داشت و در شرایط مطلوب نزدیک به بوشهر عمل کرد، اما با اعمال استرس ترکیبی، افت بیشتری را نسبت به بوشهر تجربه کرد. این تفاوت‌های اکوتیپی در گرادیان رنگی نمودار حرارتی به‌خوبی نمایان هستند و پتانسیل بالای انتخاب ژرم‌پلاسم مقاوم را برای بهبود عملکرد سالیکورنیا در محیط‌های شور و خشک برجسته می‌سازند. نتایج حاکی از آن هستند که اکوتیپ بوشهر به‌عنوان یک منبع ژنتیکی برتر، گزینه‌ای مناسب برای کشت در مناطق حاشیه‌ای با محدودیت آب و شوری بالا است، درحالی‌که استفاده از اکوتیپ مرکزی نیازمند شرایط کنترل‌شده و مدیریت دقیق منابع آبی است. اکوتیپ گرگان نیز می‌تواند با اعمال آبیاری مکمل و انتخاب زمین‌های با شوری پایین، عملکرد قابل قبولی ارائه دهد. این یافته‌ها بر اهمیت غربالگری اکوتیپ‌های بومی و بهره‌گیری از تنوع ژنتیکی در برنامه‌های به‌نژادی گیاهان هالوفیت تأکید دارند.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]



شکل ۷- بررسی و تحلیل نقشه حرارتی درصد جوانه‌زنی در سه اکوتیپ سالیکورنیا

Figure 7. Examination and analysis of the heatmap of germination percentages for three *Salicornia* ecotypes

این پژوهش به‌منظور بررسی پاسخ سه اکوتیپ سالیکورنیا به تنش ترکیبی شوری و کم‌آبی در مرحله حساس جوانه‌زنی طراحی و اجرا شد. یافته‌های ما به‌وضوح نشان می‌دهند که هر دو فاکتور شوری و کم‌آبی به‌طور مستقل و در تعامل با یکدیگر، تأثیر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی اکوتیپ‌های مورد مطالعه دارند. نتایج مطابق با انتظار، کاهش تدریجی و قابل توجه جوانه‌زنی را با افزایش سطح شوری و کاهش میزان آب در دسترس گیاه نشان دادند. این الگوی کلی با گزارش‌های سایر محققین در مورد گیاهان هالوفیت از جمله گونه‌های مختلف سالیکورنیا همخوانی دارد (Singh *et al*., 2014; de la Reguera *et al*., 2020; Moghaddam *et al*., 2023). تنش شوری از دو طریق بر جوانه‌زنی تأثیر می‌گذارد: اول، اثر اسمزی که جذب آب توسط بذر را کاهش می‌دهد و فرآیندهای متابولیک اولیه را مختل می‌کند. دوم، سمیت یونی که در غلظت‌های بالا به ساختار سلول و آنزیم‌ها آسیب می‌زند. هنگامی‌که این دو تنش به‌صورت ترکیبی اعمال می‌شوند، اثرات آن‌ها می‌توانند به شکل هم‌افزایی (سینرژیستیک) عمل کنند و خسارت بیشتری به‌همراه داشته باشند، همان‌گونه که در کاهش شدید جوانه‌زنی در تیمار ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر همراه با ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد (Qu *et al*., 2007; Al-Tamimi *et al*., 2023). یکی از یافته‌های کلیدی این تحقیق، بروز تفاوت‌های اکوتیپی بارز در تحمل به تنش‌های اعمال شده بود. در تمامی سطوح شوری و آبیاری، اکوتیپ بوشهر به‌طور پیوسته بالاترین درصد جوانه‌زنی را از خود نشان داد و به‌عنوان مقاوم‌ترین اکوتیپ شناسایی شد. در مقابل، اکوتیپ مرکزی در بیشتر تیمارها حساس‌ترین پاسخ را داشت و اکوتیپ گرگان نیز عملکردی بینابین از خود نشان داد. این تفاوت را می‌توان به سازگاری اکولوژیک و ژنتیکی هر اکوتیپ با شرایط بومی خود نسبت داد. احتمالاً اکوتیپ بوشهر که از مناطق ساحلی با شوری بالا و تابش شدید نور منشأ می‌گیرد، مکانیسم‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی کارآمدتری را برای مقابله با تنش‌های اسمزی و یونی تکامل بخشیده است. این مکانیسم‌ها عبارت‌اند از تجمع کارآمدتر اسمولیت‌ها (پرولین و گلیسین بتائین)، فعال‌سازی قوی‌تر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و تنظیم بهتر تعادل یونی (Fussy *et al*., 2024). این یافته با نتایج مطالعات دیگر که برتری اکوتیپ بوشهر را در شرایط شور تأیید کرده‌اند، هم‌سو است (Izadi *et al*., 2024; Akbarzadeh *et al*., 2025; Ranjbar *et al*., 2021). در تحقیقی مشابه توسط اکبرزاده و همکاران در خصوص تأثیر شوری بر ارتفاع و تعداد شاخه، گزارش شد که اکوتیپ بوشهر در مرحله رشد رویشی تحت تنش ترکیبی شوری و کم‌آبی، بیشترین ارتفاع و تعداد شاخه را داشت و آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت زراعی را برای بهره‌وری بهینه توصیه کردند (Akbarzadeh *et al*., 2026). نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که حتی سطوح پایین شوری (۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) نیز می‌تواند به‌طور محسوسی جوانه‌زنی را کاهش دهد، به‌ویژه هنگامی‌که با محدودیت آبی همراه شود. این موضوع بر حساسیت بالای مرحله جوانه‌زنی نسبت به تنش‌های محیطی تأکید دارد. با این‌حال، نکته امیدبخش این بود که حتی در شرایط شدید (شوری ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر و آبیاری ۵۰ درصد)، درصدی از بذرهای اکوتیپ بوشهر (۱۵ درصد) توانستند جوانه بزنند که این امر پتانسیل ژنتیکی بالای این اکوتیپ را برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی و کشت در محیط‌های بسیار شور نشان می‌دهد (Glenn *et al*., 1999; Ventura & Sagi, 2013).

در مجموع و به‌طور خلاصه، نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که: ۱- با توجه به حساسیت بالای مرحله جوانه‌زنی، تأمین آب کافی (حداقل ۷۵ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) در ابتدای کشت برای استقرار موفقیت‌آمیز گیاه ضروری است. پس از استقرار گیاهچه‌ها، می‌توان سطوح پایین‌تر آبیاری را به‌تدریج

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

اعمال کرد. ۲- اگرچه سالیکورنیا گیاهی شورپسند است، اما برای دستیابی به حداکثر درصد جوانه‌زنی و استقرار اولیه مطلوب، بهتر است از آب با شوری نسبتاً پایین (زیر ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) در مرحله جوانه‌زنی استفاده شود و سپس به‌تدریج شوری آب افزایش یابد. ۳- به دلیل مقاومت برتر، اکوتیپ بوشهر گزینه اول برای کشت در شرایط شور و نیمه‌خشک است.

مهم‌ترین محدودیت این پژوهش انجام آزمایش در شرایط گلخانه‌ای غیر کنترل شده با نوسانات دمایی بالا است که اگرچه شرایط میدانی را تا حدی شبیه‌سازی می‌کند، اما ممکن است بر دقت نتایج تأثیر گذاشته باشد. برای تکمیل این یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود که مطالعات آینده، پاسخ این اکوتیپ‌ها را در مراحل رشد رویشی و زایشی و نیز تحت تأثیر کاربرد محرک‌های رشد مانند هورمون‌ها یا باکتری‌های محرک رشد مورد بررسی قرار دهند (Razzaghi Komaresofla *et al*., 2019; Mahmoudi & Danesh, 2019). در مجموع، این پژوهش گامی مهم در جهت شناسایی اکوتیپ‌های مقاوم سالیکورنیا و بهینه‌سازی مدیریت آبیاری آن‌ها در شرایط تنش ترکیبی شوری و کم‌آبی برداشته است. نتایج به‌دست آمده می‌توانند پایه‌ای برای توسعه پروتکل‌های کشت پایدار این گیاه ارزشمند در مناطق مبتلا به شوری و کمبود آب باشند.

نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که تنش‌های شوری و کم‌آبی، چه به‌صورت مستقل و چه در تعامل با یکدیگر، تأثیر منفی قابل توجهی بر درصد جوانه‌زنی و استقرار اولیه سه اکوتیپ سالیکورنیا دارند. با افزایش شوری آب آبیاری از سطح شاهد به ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر و کاهش تأمین آب از ۱۰۰ درصد به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، کاهشی تدریجی و معنی‌دار در جوانه‌زنی تمامی اکوتیپ‌ها مشاهده شد. این نتایج، حساسیت بالای مرحله جوانه‌زنی این گیاه را به شرایط محیطی تأیید می‌کند. مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، شناسایی واکنش متفاوت اکوتیپ‌ها و برجسته‌سازی برتری اکوتیپ بوشهر از نظر تحمل به تنش ترکیبی شوری و کم‌آبی بود. اکوتیپ بوشهر در تمامی تیمارها، به‌ویژه در سطوح بالای شوری، مقاوم‌ترین عملکرد را نشان داد و اکوتیپ مرکزی به‌عنوان حساس‌ترین اکوتیپ شناسایی شد. این امر، اهمیت انتخاب اکوتیپ مناسب را به‌عنوان عاملی کلیدی برای موفقیت درکشت سالیکورنیا در استان زنجان نشان می‌دهد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهند که برای دستیابی به حداکثر جوانه‌زنی و استقرار مطلوب، تأمین آب کافی (در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) در مراحل اولیه رشد ضروری است. همچنین، استفاده از آب با شوری نسبتاً پایین در مرحله جوانه‌زنی و سپس افزایش تدریجی آن می‌تواند راهکار مدیریتی مناسبی باشد. در نهایت، با توجه به پتانسیل ژنتیکی بالای اکوتیپ بوشهر، استفاده از این اکوتیپ و گنجاندن آن در برنامه‌های به‌نژادی برای توسعه کشت پایدار سالیکورنیا در شرایط سخت محیطی پیشنهاد می‌شود. در مجموع، این پژوهش گامی مؤثر در جهت بهره‌برداری از گیاهان شورپسند برای احیای اراضی شور و تأمین امنیت غذایی در شرایط تغییر اقلیم برداشته است.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های مالی و پشتیبانی ارزشمند سازمان بسیج علمی، پژوهشی و فناوری استان زنجان و بسیج مهندسی کشاورزی استان زنجان که نقش مؤثری در اجرای این پروژه داشتند، صمیمانه قدردانی نمایند. همچنین، از جناب آقای دکتر انصاری، مهندس حسنی و مهندس میرزایی، ناظران سازمان مربوطه، به‌دلیل نظارت و همکاری در اجرای پروژه، کمال تشکر و امتنان را داریم. حمایت‌های ایشان و سایر همکاران، زمینه‌ساز اجرای موفق این طرح پژوهشی گردید. و همچنین از دکتر رنجبر هیئت‌علمی مرکز تحقیقات شوری یزد که در خصوص تأمین بذر نهایت همکاری را داشته‌اند کمال تشکر را دارم و از خدای متعال برای ایشان آرزوی سلامتی و تندرستی خواستارم.

تعارض منافع: هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

References

Akbarzadeh, P., Shadman, H., Akbarzadeh, M., Aghajanloo, F., & Rostamizad, G. (2025). Feasibility study of cultivation and identification of a suitable ecotype of Salicornia in cold semi-arid ecosystems through evaluation of different cultivation bed methods (Case study: Zanjan). Management of Natural Ecosystems, 34(3), 1–13. https://doi.org/10.22034/emj.2025.729541 [In Persian]

Akbarzade, P., Akbarzadeh, M., & Shadman, H. (2026). Investigation of Salinity and Drought Stresses on Morphological Traits, Physiological Indices, and Adaptation of Salicornia Ecotypes. *Sustainable Agricultural Science Research,* 6(1), 1-30. https://doi.org/10.71667/sarj.2026.1224803 [In Persian]

Al-Tamimi, M., Green, S., Abou Dahr, W., Al-Muaini, A., Lyra, D., Ammar, K., Dawoud, M., Kenyon, P., Kemp, P., Kennedy, L., McLachlan, A., & Clothier, B. (2023). Drainage, salt-leaching impacts, and the growth of Salicornia bigelovii irrigated with different saline waters. *Agricultural Water Management,* 289, 108441. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108512

Baniaghil, A. S., Pirdashti, H., Esmaeili, M. A., Ramezani, M., & Yaghoubian, Y. (2025). Evaluation and selection of salinity-tolerant genotypes in different species of the Brassica (*Brassica* spp.) genus in the germination stage. *Journal of Crop Breeding,* 17(4), 55-71. https://doi.org/10.61882/jcb.2025.1575 [In Persian]

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil,* 39(1), 205–207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]

Darvishi, A., Maleki, M., & Aghaleh, M. (2013). Study of the growth of Salicornia europaea and S. persica for cultivation in saline and arid climates. In Proceedings of the 3rd Conference on Environmental Planning and Management, Tehran. Retrieved from https://civilica.com/doc/239851 [In Persian]

de la Reguera, E., Veatch, J., Gedan, K., & Tully, K. L. (2020). The effects of saltwater intrusion on germination success of standard and alternative crops. Environmental and Experimental Botany, 180, Article 104254. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104254

Fussy, A., & Papenbrock, J. (2024). Molecular analysis of the reactions in Salicornia europaea to varying NaCl concentrations at various stages of development to better exploit its potential as a new crop plant. *Frontiers in Plant Science,* 15, 1454541. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1454541

Gheytaranpour Sehriq, S., Aharizad, S., & Baghban Kohneh Rouz, B. (2025). Evaluation of the effect of plant growth regulators and salinity on in vitro micropropagation of Salicornia iranica Akhani populations. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology),* 38(1), 49-64. https://doi.org/10.22034/jpr.2025.2278 [In Persian]

Glenn, E. P., Brown, J. J., & Blumwald, E. (1999). Salt tolerance and crop potential of halophytes. *Critical Reviews in Plant Sciences,* 18(2), 227–255. https://doi.org/10.1080/07352689991309207

Grieve, C. M., & Grattan, S. R. (1983). Rapid assay for determination of water-soluble quaternary ammonium compounds. *Plant and Soil,* 70(2), 303–307. https://doi.org/10.1007/BF02374789

Izadi, Y., Nabipour, M., & Ranjbar, G. (2025). Variations in growth, physiology and fodder quality among Salicornia persica ecotypes irrigated with Persian Gulf seawater. *Scientific Reports,* 15(1), 28850. https://doi.org/10.1038/s41598-025-15008-6 [In Persian]

Jordine, A. M. K. (2025). Unraveling the resilience of Salicornia europaea: physiological and molecular responses to combined environmental stresses (Doctoral dissertation). RWTH Aachen University, Aachen, Germany.

Khosh-Khalgh Sima, N. A., Ebadi, A., & Riahi Samani, B. D. R. (2020). Salicornia: applications, economic potential, cultivation, and utilization. Agricultural Education Publishing, Agricultural Research, Education, and Extension Organization. [In Persian]

Koshida, K., Kawagishi, K., & Ito, Y. (2025). Cutting propagation of Salicornia europaea L. and the optimum NaCl and nutrient solution levels for its rooting and growth. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology,* 100(2), 265–271. https://doi.org/10.1080/14620316.2024.2396004

Lombardi, T., Bertacchi, A., Pistelli, L., Pardossi, A., Pecchia, S., Toffanin, A., & Sanmartin, C. (2022). Biological and agronomic traits of the main halophytes widespread in the Mediterranean region as potential new vegetable crops. *Horticulturae*, 8(3), 195. https://doi.org/10.3390/horticulturae8030195

Mahmoudi, A., & Danesh, M. (2019). Effect of salinity on some morphological, physiological traits and in vitro cultivation of the halophyte Salicornia europaea. *Crop Improvement,* 11(29), 161–168. https://doi.org/10.29252/jcb.11.29.161 [In Persian]

Moghaddam, A., Larijani, H. R., Oveysi, M., Tohidi Moghaddam, H. R., & Nasri, M. (2023). Alleviating the adverse effects of salinity stress on Salicornia persica using sodium nitroprusside and potassium nitrate. *BMC Plant Biology,* 23(1), 166. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04179-x

Neysi, B., Ranjbar, G., & Najafi Zarini, H. (2026). The evaluation of yield and some morphological traits in the double haploid line of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) under drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding,* 18(1), 163-176. https://doi.org/10.61882/jcb.2026.1647 [In Persian]

Puccinelli, M., Marchioni, I., Botrini, L., Carmassi, G., Pardossi, A., & Pistelli, L. (2024). Growing Salicornia europaea L. with saline hydroponic or aquaculture wastewater. *Horticulturae,* 10(2), 196. https://doi.org/10.3390/horticulturae10020196

Qu, X. X., Huang, Z. Y., Baskin, J. M., & Baskin, C. C. (2007). 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. https://doi.org/10.1093/aob/mcm047

Ranjbar, G., Dehghani, F., Alaei-eddin, A., Soltani Gerd-Faramerzi, V., & Keshtkar, S. (2021). Evaluation of performance of some Salicornia species and ecotypes irrigated with seawater and saline groundwater. *Journal of Water in Agriculture,* 35(2), 187–199. https://doi.org/10.22092/jwra.2021.354947.875 [In Persian]

Razzaghi Komaresofla, B., Alikhani, H. A., Etesami, H., & Khoshkholgh-Sima, N. A. (2019). Improved growth and salinity tolerance of the halophyte Salicornia sp. by co-inoculation with endophytic and rhizosphere bacteria. *Applied Soil Ecology,* 138, 160–170. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.022

Singh, D., Buhmann, A. K., Flowers, T. J., Seal, C. E., & Papenbrock, J. (2014). Salicornia as a crop plant in temperate regions: Selection of genetically characterized ecotypes and optimization of their cultivation conditions. AoB PLANTS, 6, plu071. https://doi.org/10.1093/aobpla/plu071

Ventura, Y., & Sagi, M. (2013). Halophyte crop cultivation: The case for Salicornia and Sarcocornia. *Environmental and Experimental Botany,* 92, 144–153. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.07.010

Zerai, D. B., Glenn, E. P., Chatervedi, R., Zhongjin, L., Mamood, A. N., Nelson, S. G., & Ray, D. T. (2010). Potential for the improvement of Salicornia bigelovii through selective breeding. *Ecological Engineering,* 36, 730–739. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.01.002.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1646]