Iranian Journal of Seed Research

Homepage: https://yujs.yu.ac.ir/jisr

ISSN: 2383-1480 (Online); 2383-1251 (Print)

Multivariate Analysis of Germination and Early Growth in Damavand Basil (*Ocimum basilicum*) under Sodium Carbonate Stress

Abohassan Farhang Sardrodi [1]✉, **Maliheh Sadeghizadeh** [2], **Ali Khatibi** [3], **Ghasemali Abdolahi Koshki** [2], and **Alireza Jamali Kharenjani** [2]

1. Corresponding author, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: a.farhang@uma.ac.ir
2. Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Technical and Vocational University (TVU), Damavand, Iran. Email: sadeghizadeh.malihe@gmail.com (MS); ghasemali.1813@gmail.com (GAK); jmaly2928@gmail.com (AJK)
3. Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: alikhatibi1981@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 18 August 2025
Received: 28 February 2026
Accepted: 4 March 2026

Keywords:
Alkaline stress
Hormesis
Ocimum basilicum
Principal component analysis
Salt Tolerance Index
Seed vigor

ABSTRACT

Objective: This study aimed to distinguish early stimulatory effects from inhibitory responses in basil seeds under alkaline stress (sodium carbonate).

Method: An experiment based on completely randomized design was conducted with four Na_2CO_3 levels (0, 5, 15, and 30 mM) and three replications. Germination dynamics were assessed via germination percentage (GP), germination rate (GR), and mean germination time (MGT). Post-germination growth was evaluated using seed vigor index (SVI), biomass allocation (fresh/dry weights), and total biomass index (TBI). Salt tolerance indices (STI) were calculated, and multivariate analyses (correlation heatmap and PCA) were performed.

Results: A clear hormetic response was observed. At 5 mM, TBI reached its maximum (STI.TBI = 2.28), indicating significant growth stimulation. Concentrations above 15 mM caused a sharp decline in all indices. At 30 mM, germination capacity and early growth were severely reduced, along with decreased germination rate and disrupted biomass allocation. PCA explained 97.75% of total variance and clearly differentiated treatments. The heatmap showed a strong correlation (r = 0.962) between germination rate and seedling establishment.

Conclusions: A stimulatory threshold exists at 5 mM Na_2CO_3. The transition from hormesis to toxicity occurs between 5 and 15 mM, reflecting a limited adaptability range for Damavand basil. TBI and PCA-based clustering are reliable indicators for evaluating salt tolerance. These findings emphasize the need for careful soil and water management in alkaline environments.

Cite this article: Farhang Sardrodi, A., Sadeghizadeh, M., Khatibi, A., Abdolahi Koshki, G., & Jamali Kharenjani, A. (2026). Multivariate analysis of germination and early growth in Damavand Basil (*Ocimum basilicum*) under sodium carbonate stress. *Iranian Journal of Seed Research*, *12*(2), 47-67. http://doi.org/10.66224/yujs.12.2.47

© The Author(s).

Publisher: Yasouj University.

DOI: 10.66224/yujs.12.2.47

Highlights

- Mild sodium carbonate stress (5 mM) stimulated seedling growth in Damavand basil, confirming a hormetic response.
- PCA effectively discriminated stress levels, explaining 97.8% of total variance.
- Total Biomass Index (TBI) was identified as the most reliable indicator of alkaline stress tolerance.
- Severe stress (30 mM) impaired biomass allocation and germination kinetics, leading to poor seedling establishment.

Introduction

Alkaline stress induced by sodium carbonate (Na_2CO_3) poses a serious challenge to medicinal plant production because it simultaneously causes osmotic stress, ionic toxicity, and high pH‑related disturbances (Guo et al., 2009; Li & Yang., 2023). Basil (*Ocimum basilicum* L.), a valuable medicinal and aromatic plant, exhibits considerable sensitivity to alkaline conditions, particularly during seed germination and early seedling growth (Çamlıca & Yaldız, 2017; Khomari et al., 2007). Although salinity is generally regarded as an inhibitory factor, recent plant toxicology frameworks have demonstrated the occurrence of biphasic (hormetic) responses, where low stress levels may stimulate growth while higher levels become toxic (Calabrese & Baldwin, 2002). Therefore, the objective of this study was to evaluate the physiological and early growth responses of basil seeds under alkaline stress in order to distinguish early stimulatory effects from the sharp decline in germination and growth at higher stress levels.

Method

Basil seeds of the Damavand landrace were exposed to four concentrations of sodium carbonate (0, 5, 15, and 30 mM) in a completely randomized laboratory design with three replications. Germination behavior was quantified by percentage, rate, and mean time of germination. Early seedling performance was evaluated using the seed vigor index, biomass partitioning (fresh and dry weights), and the total biomass index (TBI). Salt tolerance indices (STI) were derived for selected traits. Multivariate techniques, including correlation heatmap and principal component analysis (PCA), were employed to explore trait relationships.

Results

A distinct hormetic response was observed in basil seeds exposed to alkaline stress. The total biomass index (TBI) peaked at 5 mM Na_2CO_3, with a salt tolerance index of 2.28, indicating significant growth stimulation. Conversely, Na_2CO_3 concentrations exceeding 15 mM led to a substantial reduction across all measured parameters. At the highest concentration (30 mM), germination capacity and early seedling growth declined sharply, accompanied by slower germination kinetics and altered biomass partitioning. Principal

component analysis accounted for 97.75% of the total data variance and clearly separated the four stress levels. Moreover, the correlation heatmap revealed a strong positive relationship (r = 0.962) between germination rate and successful seedling establishment.

Conclusions

The results demonstrate that sodium carbonate at 5 mM acts as a growth stimulant for Damavand basil seeds, establishing a clear hormetic threshold. The shift from beneficial stimulation to toxic suppression occurs within the narrow range of 5 to 15 mM, reflecting the limited alkaline adaptability of this local landrace. Among all evaluated traits, total biomass index (TBI) proved to be the most effective indicator for assessing salt tolerance, particularly when combined with PCA-based clustering. These findings underscore the necessity of precise soil and irrigation water management in alkaline-prone areas to avoid irreversible damage during early growth stages.

Author Contributions

Conceptualization, A.F.S.; methodology, A.F.S.; software, A.F.S.; validation, M.S. and A.K.; formal analysis, A.F.S.; investigation, A.F.S., G.A.K., A.J.K., M.S.Z., and A.K.; resources, M.S.Z.; data curation, A.F.S.; writing—original draft preparation, A.F.S. and M.S.; writing—review and editing, A.K.; visualization, A.F.S.; supervision, A.F.S. and A.K.; project administration, A.F.S.; funding acquisition, M.S. and A.F.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscrip. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the corresponding authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Research Vice-Presidency of the National University of Skills-Damavand Agricultural College for their financial support and cooperation in conducting this research. We also extend our gratitude to the anonymous reviewers for their constructive comments and valuable suggestions that improved the quality of this manuscript.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This study was funded by the Research Vice-Presidency of the National University of Skills, Damavand Agricultural College. The funders had no role in the design of the study;

in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

پژوهش‌های بذر ایران

Homepage: https://yujs.yu.ac.ir/jisr

ISSN: 2383-1480 (Online); 2383-1251 (Print)

تحلیل چندبعدی جوانه‌زنی و رشد اولیه ریحان دماوند (*Ocimum basilicum*) تحت تنش کربنات سدیم

ابوحسن فرهنگ سردرودی[۱] ✉، ملیحه صادقی زاده[۲]، علی خطیبی[۳]، قاسمعلی عبدالهی کوشکی[۲]، و علیرضا جمالی خرنجانی[۲]

۱. نویسنده مسئول، گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: a.farhang@uma.ac.ir

۲. گروه مهندسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، دماوند، ایران. رایانامه: sadeghizadeh.malihe@gmail.com; ghasemali.1813@gmail.com; jmaly2928@gmail.com

۳. گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: alikhatibi1981@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹

کلیدواژه‌ها:
بنیه بذر
تحلیل مؤلفه‌های اصلی
تنش قلیایی
درانگیختن
ریحان
شاخص تحمل شوری

چکیده

هدف: این مطالعه با هدف تفکیک پاسخ‌های تحریکی اولیه از اثرات بازدارنده در بذر ریحان تحت تنش قلیایی (کربنات سدیم) انجام شد.

روش پژوهش: آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار سطح کربنات سدیم (صفر، ۵، ۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار) و سه تکرار اجرا شد. پویایی جوانه‌زنی با درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و میانگین زمان جوانه‌زنی ارزیابی گردید. رشد پس از جوانه‌زنی با شاخص بنیه بذر، تخصیص زیست‌توده (وزن تر و خشک) و شاخص زیست‌توده کل (TBI) سنجیده شد. شاخص‌های تحمل به شوری (STI) محاسبه و تحلیل‌های چندمتغیره (نقشه حرارتی همبستگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)) انجام گرفت.

یافته‌ها: یک پاسخ درانگیختن (هورمزیس) واضح مشاهده شد. در غلظت ۵ میلی‌مولار، TBI به حداکثر مقدار خود رسید (STI.TBI = ۲/۲۸) که نشان‌دهنده تحریک معنی‌دار رشد است. غلظت‌های بالاتر از ۱۵ میلی‌مولار باعث کاهش شدید همه شاخص‌ها شد. در ۳۰ میلی‌مولار، توان جوانه‌زنی و رشد اولیه به شدت کاهش یافت که با کاهش سرعت جوانه‌زنی و اختلال در تخصیص زیست‌توده همراه بود. تحلیل PCA معادل ۹۷/۷۵ درصد از واریانس کل را تبیین کرد و تیمارها را به خوبی تفکیک نمود. نقشه حرارتی همبستگی قوی (r =۰/۹۶۲) بین سرعت جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه نشان داد.

نتیجه‌گیری: یک آستانه تحریکی در غلظت ۵ میلی‌مولار کربنات سدیم وجود دارد. گذار از هورمزیس به سمیت بین ۵ تا ۱۵ میلی‌مولار رخ می‌دهد که نشان‌دهنده دامنه تطبیق‌پذیری محدود ریحان دماوند است. شاخص TBI و خوشه‌بندی مبتنی بر PCA به عنوان شاخص‌های قابل‌اطمینان برای ارزیابی تحمل به شوری معرفی می‌شوند. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت دقیق خاک و آب در محیط‌های قلیایی تأکید دارد.

جنبه‌های نوآوری:

- تنش کربنات سدیم (۵ میلی‌مولار) رشد گیاهچه ریحان دماوند را تحریک کرد که بیانگر پاسخ درانگیختن است.
- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با تبیین ۹۷/۸٪ از واریانس، سطوح تنش را به خوبی تفکیک کرد.
- شاخص زیست‌توده کل (TBI) به عنوان معیار قابل‌اعتمادترین شاخص تحمل به تنش قلیایی معرفی شد.
- تنش شدید (۳۰ میلی‌مولار) با اختلال در تخصیص زیست‌توده و کینتیک جوانه‌زنی، موجب استقرار ضعیف گیاهچه گردید.

استناد: فرهنگ سردرودی، ابوحسن؛ صادقی زاده، ملیحه؛ خطیبی، علی؛ عبدالهی کوشکی، قاسمعلی؛ و جمالی خرنجانی، علیرضا (۱۴۰۴). تحلیل چندبعدی جوانه‌زنی و رشد اولیه ریحان دماوند (*Ocimum basilicum*) تحت تنش کربنات سدیم. *پژوهش‌های بذر ایران*، ۱۲(۲)، ۶۷-۴۷.
http://doi.org/10.61882/yujs.12.2.47

ناشر: دانشگاه یاسوج.

© نویسندگان.

مقدمه

ریحان (*Ocimum basilicum* L.) از مهم‌ترین گیاهان دارویی و معطر تیره نعناعیان (*Lamiaceae*) است که بذر آن به دلیل دارا بودن لایه موسیلاژی، ویژگی‌های هیدرودینامیکی و فیزیولوژیکی منحصربه‌فردی را در مرحله جذب آب نشان می‌دهد (ژو[1] و همکاران، ۲۰۲۲). با وجود پتانسیل بالای تولید این گیاه، استقرار نامطلوب بوته در مناطق نیمه‌خشک، به دلیل حساسیت بالای مراحل اولیه جوانه‌زنی به کیفیت آب و خاک، از چالش‌های اساسی تولید آن محسوب می‌شود (جهانبخش[2] و همکاران، ۲۰۱۹). در این میان، تنش نمک‌های قلیایی نظیر کربنات سدیم، به دلیل شیوع بالایی که در اراضی تحت آبیاری دارند، تهدیدی جدی برای جوانه‌زنی بذر به شمار می‌روند (لی[3] و همکاران، ۲۰۲۲). برخلاف تنش شوری خنثی (مانند کلرید سدیم)، تنش قلیایی ناشی از کربنات سدیم علاوه بر ایجاد فشار اسمزی و سمیت یونی ناشی از یون‌های سدیم (Na^+) و کربنات (CO^{-2})، به دلیل افزایش pH محیط، منجر به اختلال در نفوذپذیری غشاء و مهار فعالیت آنزیم‌های کلیدی در بذر می‌شود (شی و شنگ[4]، ۲۰۰۵). با توجه به اینکه پاسخ‌های جوانه‌زنی بذر به این تنش، مجموعه‌ای از پارامترهای همبسته و پیچیده است، تحلیل‌های آماری تک‌متغیره به‌تنهایی قادر به تبیین روابط درونی این شاخص‌ها نیستند. از این رو، بهره‌گیری از روش‌های تحلیل چندمتغیره نظیر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ترسیم بای‌پلات برای درک دقیق‌تر برهم‌کنش صفات و شناسایی شاخص‌های حساس به تنش کربنات سدیم در بذر ریحان ضروری به نظر می‌رسد (جولیفی و کادیما[5]، ۲۰۱۶).

در مرحله جوانه‌زنی، حضور نمک‌های کربناته با افزایش پتانسیل اسمزی محیط، فاز جذب آب را به تأخیر انداخته و با مهار فعالیت آنزیم‌های هیدرولیزکننده ذخایر بذر، منجر به کاهش بنیه گندم می‌گردد (بیولی[6] و همکاران، ۲۰۱۳). اگرچه مطالعات گسترده‌ای روی پاسخ بذر سورگوم به تنش کلرید سدیم صورت گرفته است (رجبی دهنوی[7] و همکاران، ۲۰۲۰)، اما تأثیرات مخرب تنش‌های ناشی از نمک‌های قلیایی به دلیل ماهیت پیچیده و تغییرات شدید pH محیط، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال، گزارش شده است که بذر ریحان حساسیت بالایی به شوری داشته و در سطوح بالاتر از ۲۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم، به دلیل اختلال در فرآیند تورژسانس و سمیت یون کلر، فاقد توانایی جوانه‌زنی است (خماری[8] و همکاران، ۲۰۰۷)؛

با این حال، شدت بازدارندگی در تنش‌های قلیایی ناشی از نمک‌هایی مانند کربنات سدیم اغلب بیشتر از تنش‌های شوری خنثی گزارش شده است؛ زیرا در این شرایط، بذر علاوه بر فشار اسمزی، در معرض pH بالای محیط (معمولاً در محدوده قلیایی حدود ۹ تا ۱۱) نیز قرار می‌گیرد که می‌تواند با اختلال در متابولیسم کربوهیدرات‌ها و کاهش فعالیت آنزیم‌های کلیدی نظیر آلفاآمیلاز در مرحله پیش‌جوانه‌زنی همراه باشد (زرندی میان‌دوآب و ادیب ینگجی[9]، ۲۰۱۹). مطالعات اخیر در سایر گونه‌های دارویی تیره نعناعیان نشان داده است که تنش کربنات سدیم با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، موجب پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء در بذر شده و نشت الکترولیت‌ها را به‌شدت افزایش می‌دهد (شی و شنگ، ۲۰۰۵). علاوه بر این، در بذرهای دارای موسیلاژ مانند، غلظت بالای یون‌های سدیم می‌تواند با تأثیر بر ویژگی‌های کلوئیدی و پتانسیل ماتریک موسیلاژ، سدی در برابر جذب آب ایجاد کرده و فرآیند جوانه‌زنی را به تأخیر بیندازد (یانگ[10] و همکاران، ۲۰۱۲). با وجود این، پژوهش‌های مربوط به پرایمینگ و پاسخ بذرها به تنش‌ها بطور عمده بر بهبود جوانه‌زنی، استقرار گیاهچه، یکنواختی ظهور و بنیه بذر متمرکز بوده‌اند و بررسی یکپارچه این صفات در شرایط تنش قلیایی، به‌ویژه با رویکردهای چندمتغیره، همچنان محدود است (مک دونالد و موهان[11]، ۲۰۲۵).

1. Zhou
2. Jahanbakhsh
3. Li
4. Shi & Sheng
5. Jolliffe & Cadima
6. Bewley
7. Rajabi Dehnavi
8. Khomari
9. Zarandi Miandoab & Adib Yengeje
10. Yang
11. MacDonald & Mohan

با توجه به اینکه حدود ۶/۸ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی ایران (حدود ۳۸ درصد) با درجات مختلفی از شوری و قلیایی بودن مواجه هستند (مومنی[1]، ۲۰۱۱)، شناسایی آستانه تحمل بذر در حساس‌ترین مرحله چرخه زندگی گیاه ضرورتی دوچندان دارد. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف کمی‌سازی اثر سطوح مختلف کربنات سدیم بر مؤلفه‌های جوانه‌زنی بذر ریحان و همچنین بهره‌گیری از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) جهت گروه‌بندی شاخص‌های حساس و تعیین روابط درونی صفات از طریق ترسیم بای‌پلات انجام شد تا از این طریق، دقیق‌ترین شاخص‌های غربالگری برای تحمل به تنش قلیایی در بذر ریحان شناسایی گردند.

مواد و روش‌ها

بذرهای توده بومی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) از گیاهان کشت‌شده در محوطه سازمان ملی مهارت، واحد دماوند، در مرحله رسیدگی کامل بذر جمع‌آوری شدند. پس از جمع‌آوری، بذرها تمیز شده و تا زمان انجام آزمایش در شرایط خشک و دمای اتاق نگهداری شدند. این بذرها در سال ۱۴۰۳ تهیه شده و منشأ آن‌ها شهرستان دماوند، استان تهران بود. بذرهای ریحان بر اساس مطالعات قبلی، به مدت یک دقیقه توسط محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد ضدعفونی و سپس با آب دیونیزه شست‌وشو داده شدند (طالئی[2] و همکاران، ۲۰۱۱). آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۴ در آزمایشگاه دانشگاه ملی مهارت واحد آموزشکده کشاورزی دماوند (با موقعیت جغرافیایی ۳۹′ ۳۵° شمالی و ۱۱′ ۵۲° شرقی و ارتفاع ۲۰۴۵ متر از سطح دریای آزاد) انجام شد. تیمارها شامل صفر، ۵، ۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار کربنات سدیم بودند. در هر تکرار، تعداد ۱۰۰ بذر یکنواخت و سالم به‌صورت ۱۰۰ بذر در هر پتری ۹ سانتی‌متری سترون شده کشت شدند. بذرها روی کاغذ صافی واتمن شماره ۱ قرار داده شدند و به هر پتری ۵ میلی‌لیتر از محلول مربوط به تیمار افزوده شد. با توجه به ماهیت لعاب‌دار (موسیلاژی) بذر ریحان، بذرها با فواصل مشخص در پتری‌ها قرار داده شدند تا از تجمع لعاب و ممانعت از تبادل گاز جلوگیری شود. با این حال، محدودیت‌های فیزیولوژیک ناشی از لایه موسیلاژی در شرایط تنش، به عنوان یکی از عوامل مؤثر در سرعت توسعه گیاهچه در نظر گرفته شد. جهت انجام آزمون جوانه‌زنی، پتری در انکوباتور و در دمای ثابت ۲۵±۲ درجه سلسیوس و در تاریکی قرار گرفتند. انتخاب این دما بر اساس شرایط بهینه گزارش‌شده برای جوانه‌زنی بذر ریحان در مطالعات پیشین انجام شد. به منظور حذف اثر نور و ایجاد شرایط یکنواخت برای مقایسه تیمارها، آزمایش در تاریکی انجام گرفت. شمارش بذرهای جوانه‌زده به‌صورت روزانه و در ساعت مشخصی به مدت ۱۴ روز انجام شد. اگرچه مطابق پروتکل استاندارد انجمن بین‌المللی آزمون بذر (ISTA[3])، دوره استاندارد برای تعیین درصد نهایی جوانه‌زنی ریحان ۲۱ روز و معیار آن تشکیل گیاهچه عادی است، اما در این مطالعه فیزیولوژیک، شاخص «خروج ریشه‌چه» (Radicle emergence ≥ 2 mm) به دلیل حساسیت بالا در ارزیابی زودهنگام واکنش بذر به تنش، ملاک عمل قرار گرفت. این بازه ۱۴ روزه برای مقایسه سینتیک جوانه‌زنی و بنیه گیاهچه در سطوح مختلف تنش کفایت می‌کرد و نتایج ارائه‌شده ناظر بر پویایی جوانه‌زنی در این بازه است. اندازه‌گیری صفات رشد اولیه پیش از بروز علائم شدید اتیولگی انجام شد. بذرهای مورد استفاده فاقد خواب فیزیولوژیک محسوس بوده و بدون نیاز به تیمار شکستن خواب، جوانه‌زنی یکنواختی نشان دادند. پس از دو هفته از آغاز آزمایش صفاتی همچون وزن تر ساقه‌چه (SFW[4])، وزن تر ریشه‌چه (RFW[5])، وزن تر کل (TFW[6])، وزن خشک ریشه‌چه (RDW[7])، وزن خشک ساقه‌چه (SDW[8]) و وزن خشک کل (TDW[9]) توسط ترازوی ۰/۰۰۰۱ گرم و طول ساقه‌چه (SLM[10])، طول ریشه‌چه (RLM[11]) و طول گیاهچه (PLM[12]) توسط کولیس اندازی گیری شدند. برای تعیین وزن خشک،

[1]. Moameni
[2]. Talei
[3]. International seed testing association
[4]. Shoot fresh wight
[5]. Root fresh weight
[6]. Total fresh weight
[7]. Root dry weight
[8]. Shoot dry weight
[9]. Total dry weight
[10]. Shoot length means
[11]. Root length means
[12]. Petiole length means

گیاهچه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت (حدود ۴۸ ساعت) خشک و سپس توزین شدند. همچنین درصد جوانه‌زنی (GP[1])، میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT[2])، شاخص سرعت جوانه‌زنی (GSI[3])، شاخص بنیه گیاهچه (SVI[4])، وزن خشک نسبی ریشه (RDWR[5])، شاخص زیست‌توده کل (TBI[6]) و نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه (RS[7]) از روابط ۱-۸ محاسبه شدند (علی‌رضایی نوقاندر[8] و همکاران، ۲۰۱۳):

رابطه ۱) درصد جوانه‌زنی:

که در این فرمول NG تعداد کل بذرهای جوانه زده و NT تعداد کل بذرهای کشت شده می‌باشد.

رابطه ۲) سرعت جوانه‌زنی:

در این رابطه GR سرعت جوانه زنی و ...، a،b ،c،d و n نشان دهنده تعداد بذرهای جوانه زده پس از ...،۴ ،۳ ،۲ ،۱و N روز بعد از کشت بذرها می‌باشد.

رابطه ۳) میانگین زمان جوانه‌زنی:

که در این رابطه Ni تعداد بذرهای جوانه زده شده و Di روز انجام شمارش می‌باشند.

رابطه ۴) شاخص جوانه‌زنی:

$$GI = \Sigma \frac{Gt}{Tt}$$

که در این رابطه Gt تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز t و Tt تعداد روزها از شروع آزمایش می‌باشند.

رابطه ۵) شاخص زیست‌توده کل: عبارتست از وزن خشک کل تقسیم بر تعداد بذر جوانه زده

رابطه ۶) وزن خشک نسبی ریشه: برابر است با وزن خشک ریشه تقسیم بر وزن خشک کل

رابطه ۷) نسبت طول ریشه چه به ساقه چه: از تقسیم طول ریشه چه به ساقه چه حاصل می‌شود.

رابطه ۸) شاخص بنیه گیاهچه: عبارتست از حاصلظرب درصد جوانه‌زنی در طول گیاه تقسیم بر ۱۰۰ (خورشیدی[9]، ۲۰۲۰).

رابطه ۹) شاخص تحمل به شوری: نسبت مقادیر یک صفت در شرایط تنش به مقادیر همان صفت در شرایط بدون تنش تعریف می‌شود، یکی از پارامترهای کمی مهم برای ارزیابی واکنش گیاهان به تنش شوری است (فرناندز[10]، ۱۹۹۲).

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها

به‌منظور بررسی اثر سطوح مختلف کربنات سدیم بر صفات جوانه‌زنی و رشد اولیه ریحان، داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل شدند. تجزیه واریانس (ANOVA) با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ انجام گرفت. پیش‌فرض‌های نرمال بودن داده‌ها و یکنواختی واریانس‌ها به‌ترتیب با آزمون شاپیرو–ویلک و لون بررسی شدند. در صورت معنی‌دار بودن اثر تیمار، مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن نجام شد.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

به‌منظور بررسی الگوهای همبستگی و کاهش ابعاد داده‌های صفات جوانه‌زنی و رشد ریحان تحت تأثیر تیمارهای مختلف شوری کربنات سدیم، تحلیل مؤلفه‌های اصلی(PCA[11]) به‌کار گرفته شد. داده‌های کمی مربوط به صفات به‌عنوان ورودی تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با بهره‌گیری از ابزار آنلاین موجود در وب‌سایت StatsKingdom (نسخه دسترسی: ژوئیه ۲۰۲۵) انجام شد. در ابتدا داده‌ها به‌منظور حذف اثر تفاوت در واحدهای اندازه‌گیری، استانداردسازی شدند (میانگین صفر و واریانس یک). سپس ماتریس همبستگی بین صفات محاسبه و مؤلفه‌های

1. Germination percetage
2. Means generation time
3. Germination speed index
4. Seedling vigor index
5. Root dry weight ratio
6. Total biomass index
7. Root to shoot Ratio
8. Alirezaei Noghondar
9. Khorshidi
10. Fernandez
11. Principal Component Analysis

اصلی استخراج گردید. انتخاب مؤلفه‌ها بر اساس مقدار ویژه (Eigenvalue > 1) و درصد واریانس تبیین‌شده انجام شد (جدول ۳). به‌منظور تفسیر روابط بین صفات و تمایز تیمارها، نمودار بی پلات[1] بر اساس دو مؤلفه اول رسم شد (شکل ۲). در تفسیر نتایج، تنها صفاتی که دارای بار مؤلفه‌ای بیشتر از ۰/۵ (loading > 0.5) بودند، به‌عنوان صفات مؤثر و کلیدی در نظر گرفته شدند.

تحلیل همبستگی بین شاخص‌ها

به‌منظور بررسی روابط بین شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده جوانه‌زنی و رشد اولیه ریحان تحت تأثیر تیمارهای کربنات سدیم، از ضریب همبستگی پیرسون[2] در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. پیش از انجام تحلیل همبستگی، نرمال بودن داده‌ها بررسی و تأیید گردید؛ بنابراین، از آزمون پیرسون برای تعیین شدت و جهت همبستگی بین صفات استفاده شد. سطوح معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد ارزیابی گردید.

به‌منظور نمایش گرافیکی شدت و جهت همبستگی بین صفات، نقشه حرارتی همبستگی با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم شد. در این نقشه، طیف رنگی از آبی تیره (همبستگی کاملاً منفی، ۱-) تا قرمز تیره (همبستگی کاملاً مثبت، ۱+) متغیر بود و رنگ سفید بیانگر عدم همبستگی (صفر) بین صفات بود.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که اثر سطوح مختلف کربنات سدیم بر کلیه صفات مورد مطالعه به جز وزن خشک نسبی ریشه، معنی‌دار بود ($P < 0.05$ یا $P < 0.01$) (جدول ۱).

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲)، شوری ۳۰ میلی‌مولار کربونات سدیم تأثیر بازدارنده قطعی بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر ریحان داشت، در حالی‌که کاهش معنادار اغلب صفات از سطح ۵ میلی‌مولار آغاز شد. تیمارهای ۵ و ۱۵ میلی‌مولار در سرعت جوانه‌زنی تفاوت معنی‌داری نداشتند، اما تیمار ۵ میلی‌مولار نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری نشان داد. میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT) در تیمار ۳۰ میلی‌مولار به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، در حالی‌که شاخص سرعت جوانه‌زنی (GSI) کاهش داشت. در شاخص بنیه گیاهچه (SVI)، تیمارهای شاهد و ۵ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشتند؛ همچنین بین تیمارهای ۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار نیز تفاوت معنی‌داری دیده نشد. نسبت طول ریشه‌چه به ساقه تنها در تیمار ۵ میلی‌مولار نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری در سطح ۱ درصد داشت، اما شاهد با تیمارهای ۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نشان نداد. وزن‌تر کل (ریشه و ساقه) در تیمار ۵ میلی‌مولار نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشت ($P<0.01$)، ولی در سطوح بالاتر (۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار) کاهش شدیدی مشاهده شد. زیست‌توده کل نیز از شاهد تا سطح ۵ میلی‌مولار افزایش یافت ($P<0.01$)، اما تیمار ۳۰ میلی‌مولار با کاهش شدید و اختلاف معنی‌دار نسبت به سایر تیمارها همراه بود. در مقابل، نسبت وزن خشک ریشه به وزن خشک کل بین تیمارها تفاوت آماری معنی‌داری نداشت. با افزایش شوری تا سطح ۵ میلی‌مولار، طول کل گیاه افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد نشان داد ($P<0.01$)، اما در سطوح ۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار کاهش شدید و تفاوت معنی‌داری با شاهد مشاهده شد. طول ساقه‌چه در تیمار ۵ میلی‌مولار نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت، اما در سطوح بالاتر به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ($P<0.01$). روند تغییرات طول ریشه نیز مشابه بود، به‌طوری‌که هر تیمار با تیمار قبلی تفاوت معنی‌داری در سطح ۱ درصد داشت. به‌ویژه، تیمار ۵ میلی‌مولار افزایش قابل توجهی در طول ریشه‌چه نسبت به شاهد داشت، در حالی‌که تیمارهای ۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار با افت شدید همراه بودند.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که حتی غلظت‌های پایین‌تر از ۳۰ میلی‌مولار کربنات سدیم نیز موجب پاسخ‌های رشدی قابل توجه در بذر ریحان می‌شود، و تیمار ۳۰ میلی‌مولار اثر بازدارنده‌ی قطعی بر جوانه‌زنی و رشد داشت (جدول ۲). کاهش معنی‌دار صفات از سطح ۵ میلی‌مولار آغاز شده که حاکی از حساسیت ریحان به تنش شوری قلیایی در مراحل ابتدایی رشد است. این نتایج با

---

1. Biplot
2. Pearson correlation coefficient

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف کربنات سدیم بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذور ریحان

Table 1. Analysis of variance of the effects of different sodium carbonate levels on germination indices of basil seeds.

میانگین مربعات (Means of Squares)									
منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	میانگین زمان جوانه‌زنی Mean Germination Time	سرعت جوانه‌زنی Germination Rate	شاخص بنیه گیاهچه Seedling Vigor Index	نسبت طول ریشه به ساقه Root-to-Shoot Length Ratio	وزن تر کل Total Fresh Weight	وزن تر ساقه‌چه Shoot Fresh Weight	وزن تر ریشه‌چه Root Fresh Weight
شوری Salinity	3	497.222*	1.519**	128.239**	49.911**	0.008*	20.878**	7.626**	3.358**
خطا Error	8	75	0.194	6.625	1.562	0.001	0.359	0.128	0.167
ضریب تغییرات (٪) CV (%)		0.64	0.28	0.19	0.39	0.64	0.39	0.10.6	0.53

* و ** به‌ترتیب بیانگر معنی‌داری در سطح ۵ درصد و معنی‌داری در سطح ۱ درصد هستند.

* and ** indicate significance at the 5% and 1% probability levels, respectively

جدول ۱: ادامه

Table 1. Continued

میانگین مربعات (Means of Squares)									
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	وزن خشک کل Total Dry Weight	وزن خشک ساقه‌چه Shoot Dry Weight	وزن خشک ریشه‌چه Root Dry Weight	شاخص زیست توده Total Biomass Index	وزن خشک نسبی ریشه‌چه Relative Root Dry Wight	طول گیاهچه Seedling Length	طول ساقه‌چه Shoot Length	طول ریشه‌چه Root Length
شوری Salinity	3	6.424**	2.514**	0.845**	0.003*	0.006^{ns}	129.932**	72.699**	10.051**
خطا Error	8	0.148	0.032	0.048	0.001	0.004	0.236	0.372	0.081
ضریب تغییرات (٪) CV (%)		0.52	0.5	0.51	0.48	0.55	0.16	0.45	0.45

ns، * و ** به‌ترتیب بیانگر عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح ۵ درصد و معنی‌داری در سطح ۱ درصد هستند.

ns, * and ** indicate non-significance, and significance at the 5% and 1% probability levels, respectively

جدول ۲. مقایسه میانگین شاخص‌های جوانه زنی بذور ریحان سطوح مختلف کربنات سدیم.

Table 2. Mean comparison of germination and early growth indices of basil seeds under different levels of sodium carbonate.

کربنات سدیم $NaCO_3$ (mM)	درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	میانگین زمان جوانه‌زنی Mean Germination Time	سرعت جوانه‌زنی Germination Rate	شاخص بنیه گیاهچه Seedling Vigor Index	نسبت طول ریشه به ساقه Root-to-Shoot Lenght Ratio	وزن تر کل Total Fresh Weight	وزن تر ساقه Shoot Fresh Weight	وزن تر ریشه Root Fresh Weight
0	66.67^{a}	3.15^{a}	24.95^{a}	9.16^{a}	0.38^{a}	4.77^{b}	2.7^{a}	2.07^{a}
5	50.00^{bc}	3.74^{a}	15.09^{b}	9.67^{a}	0.27^{b}	7.82^{a}	4.73^{b}	3.09^{b}
15	43.33^{c}	3.28^{a}	14.75^{b}	2.38^{b}	0.34^{a}	4.43^{b}	2.43^{a}	2.00^{a}
30	36.67^{c}	4.72^{b}	9.23^{c}	1.64^{b}	0.37^{a}	1.37^{c}	0.85^{c}	0.52^{c}

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means followed by the same letter within each column are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

جدول ۲: ادامه

Table 2. Continued

کربنات سدیم $NaCO_3$ (mM)	وزن خشک کل Total Dry Weight	وزن خشک ساقه‌چه Shoot Dry Weight	وزن خشک ریشه‌چه Root Dry Weight	شاخص زیست توده Total Biomass Index	وزن خشک نسبی ریشه‌چه Relative Root Dry Wight	طول گیاهچه Seedling Length	طول ساقه‌چه Shoot Length	طول ریشه‌چه Root Length
0	2.65^{b}	1.55^{b}	1.01^{b}	0.04^{bc}	0.39^{a}	13.75^{b}	5.27^{a}	8.48^{b}
5	4.49^{a}	2.78^{a}	1.71^{a}	0.09^{a}	0.38^{a}	19.3^{a}	5.17^{a}	14.13^{a}
15	2.74^{b}	1.68^{b}	1.06^{b}	0.07^{ba}	0.39^{a}	7.6^{c}	2.58^{b}	5.02^{c}
30	0.91^{c}	0.54^{c}	0.41^{c}	0.02^{c}	0.47^{a}	4.5^{d}	1.65^{c}	2.85^{d}

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means followed by the same letter within each column are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

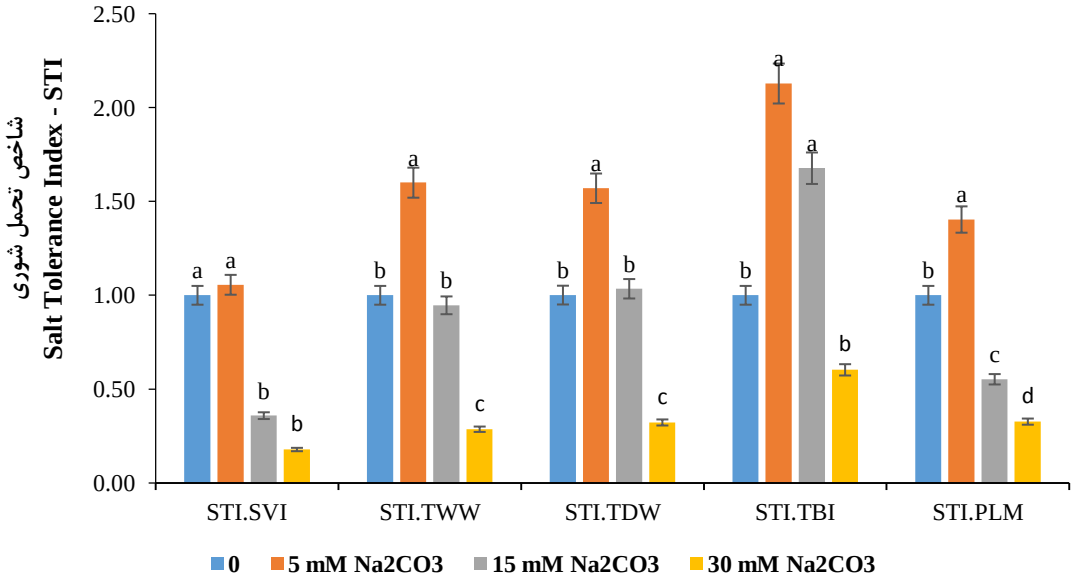
گزارش قبل خود (کامالیکا و یالدیز[1]، ۲۰۱۷) مطابقت دارد به طوری که در آن کاهش درصد جوانه‌زنی، طول ریشه و ساقه در غلظت‌های بالای ۲۰ میلی‌مولار نمک گزارش شده بود. با وجود عدم تفاوت آماری بین تیمارهای ۵ و ۱۵ میلی‌مولار، ولی کاهش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی در تیمار ۵ میلی‌مولار نسبت به شاهد نشان می‌دهد که پاسخ‌های فیزیولوژیکی به شوری از همان غلظت پایین آغاز شده و احتمالاً با فعال‌سازی تدریجی سازوکارهای جبرانی در سطح ۱۵ میلی‌مولار تعدیل شده‌اند، که بیانگر واکنش گیاه حتی به تغییرات ملایم یونی و اسمزی محیط است؛ تغییری که می‌تواند موجب اختلال در تعادل حساس آغاز جوانه‌زنی شود. در مراحل آغازین جوانه‌زنی، بذر برای رشد مؤثر گیاهچه نیازمند تعادل آب، فعال‌سازی آنزیم‌های هیدرولیتیک مانند آلفاآمیلاز و بازیابی انرژی تنفسی است. وجود حتی مقادیر اندک Na_2CO_3 با افزایش فشار اسمزی و pH محیط، می‌تواند جذب آب را کاهش دهد، تجزیه‌ی ذخایر نشاسته را به تأخیر بیندازد، و مسیرهای هورمونی مانند جیبرلین را مختل کند؛ در نتیجه، سرعت جوانه‌زنی کاهش یافته و توسعه‌ی اولیه ریشه‌چه و ساقه‌چه مختل می‌شود (بیولی و همکاران، ۲۰۱۳). عدم تفاوت معنی‌دار میان تیمارهای ۵ و ۱۵ میلی‌مولار ممکن است ناشی از رسیدن پاسخ فیزیولوژیک گیاه به سقف تحمل یا فعال شدن سازوکارهای جبرانی در تیمار ۱۵ میلی‌مولار باشد. همچنین، احتمال بروز پدیده‌ی درانگیختن[2] در تیمار ۵ میلی‌مولار وجود دارد، که طی آن تنش خفیف با تحریک مسیرهای آنزیمی و پاداکسیدانی می‌تواند موجب حفظ نسبی توان متابولیک بذر شود (پاناچی[3] و همکاران، ۲۰۲۲). با این حال، این اثر معمولاً موقتی بوده و با افزایش شدت یا مدت تنش، به توقف کامل جوانه‌زنی و تضعیف رشد می‌انجامد. علاوه بر اثرات اسمزی، ماهیت قلیایی Na_2CO_3 موجب اختلال در جذب عناصر کلیدی نظیر کلسیم، پتاسیم و منیزیم نیز می‌شود، که می‌تواند رشد اولیه بذر را محدود کند، حتی اگر رطوبت کافی وجود داشته باشد (فیض عباسی[4] و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، کاهش سرعت جوانه‌زنی در تیمار ۵ میلی‌مولار بیشتر به عدم تعادل یونی و اختلال تنظیم محیطی بذر بازمی‌گردد. افزایش معنی‌دار میانگین زمان جوانه‌زنی فقط در تیمار ۳۰ میلی‌مولار Na_2CO_3 مشاهده شد، اما کاهش تدریجی و قابل‌توجه سرعت جوانه‌زنی از سطح ۵ میلی‌مولار به بعد ثبت گردید (جدول ۲). این دو شاخص رابطه معکوس دارند؛ به عبارت دیگر تأخیر در جوانه‌زنی موجب کاهش سرعت جوانه‌زنی می‌شود. این اثر می‌تواند ناشی از برهم‌خوردن وضعیت آب بذر، اختلال در بسیج ذخایر از طریق آنزیم‌های هیدرولیتیک، و کاهش محرک‌های جوانه‌زنی مانند جیبرلین تحت شرایط تنش باشد (بیولی و همکاران، ۲۰۱۳). در تنش قلیایی کربنات سدیم، pH بالای محیط باعث کاهش جذب اولیه آب و ایجاد تغییرات شدید پتانسیل اسمزی می‌شود که آغاز متابولیسم سلولی را به تأخیر می‌اندازد (شارما و همکاران، ۲۰۲۴). افزایش

1. Çamlıca & Yaldız
2. Hormesis
3. Pannacci
4. Feyz Abasi

معنی‌دار میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT) و کاهش شدید شاخص سرعت جوانه‌زنی (GSI) نشان‌دهنده آسیب جدی به ظرفیت آغاز رشد بذر است، به‌طوری که بخشی از بذرها حتی نتوانسته‌اند وارد فاز جوانه‌زنی شوند. این وضعیت با کاهش چشمگیر شاخص‌های بنیه گیاهچه (SVI) و زیست‌توده کل (TBI) در همین تیمار همسو بوده و می‌تواند بیانگر شکست فیزیولوژیکی بذر در مواجهه با تنش شدید باشد (ژو[1]، ۲۰۰۱) . درمورد شاخص بنیه بذر (SVI)، عدم وجود اختلاف چشمگیر بین تیمار ۵ میلی‌مولار و شاهد (جدول ۲)، نشان می‌دهد که بذرهای جوانه‌زده در این تیمار، توان رشدی مشابه شاهد دارند و ساختارهای متابولیکی و ذخایر انرژی در برابر شوری ملایم حفظ شده‌اند. در واقع، سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم اسمز و یون در غلظت پایین Na_2CO_3 مؤثر بوده و از آسیب به اندام‌های تمایز یافته گیاهچه جلوگیری کرده‌اند. افت شدید این شاخص در دو تیمار بیشتر (۱۵ و ۳۰ میلی مولار کربنات سدیم) ناشی از اختلال در جذب آب، تجمع یون‌های سمی مانند Na^+ و CO_3^{2-}، و آسیب به غشاها، اندامک‌ها و پروتئین‌های دخیل در رشد است. بنابراین، سمیت یونی، اختلال اسمزی و تضعیف سامانه‌های دفاعی علت کاهش بنیه در این سطوح شوری است. شاخص تحمل به شوری (STI) نیز این الگو را تأیید می‌کند (شکل ۱)؛ در تیمار ۵ میلی‌مولار، مقادیر STI از شاهد بیشتر بوده و حاکی از اثر تحریکی تنش ملایم است، اما در تیمارهای ۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار، مقادیر STI در اکثر شاخص‌ها به‌شدت کاهش یافته که نشان‌دهنده اثر بازدارنده شوری شدید بر رشد و بقاء گیاهچه‌هاست. شاخص تحمل به شوری (STI)، که به‌صورت نسبت مقادیر یک صفت در شرایط تنش به مقادیر همان صفت در شرایط بدون تنش تعریف می‌شود، یکی از پارامترهای کمی مهم برای ارزیابی واکنش گیاهان به تنش شوری است (فرناندز، ۱۹۹۲). به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در شرایط شوری ملایم (۵ میلی‌مولار کربنات سدیم)، بذر ریحان با فعال‌سازی سازوکارهای تطبیقی و حفظ کارایی ذخایر داخلی، قادر است بخشی از رشد اولیه خود را حفظ کند و حتی در برخی شاخص‌ها مانند وزن تر و خشک کل و زیست‌توده، عملکرد بهتری نسبت به شاهد از خود بروز دهد. با این حال، افزایش سطح شوری به مقادیر بالاتر، توان سازگاری بذر را به شدت کاهش داده و آثار مخرب تنش، به ویژه از طریق تضعیف رشد گیاهچه، آشکار می‌شود. یافته‌ها حساسیت بالای مراحل ابتدایی رشد ریحان به شوری شدید را تأیید کرده و بر اهمیت مدیریت شوری خاک و آب آبیاری در این دوره تأکید دارند. افزایش چشمگیر مقادیر طول ریشه‌چه به ساقه‌چه و وزن تر و خشک کل گیاهچه، در تیمار ۵ میلی‌مولار نسبت به شاهد، و افت شدید مقادیر شاخص‌ها در شوری زیاد بیانگر یک پاسخ تطبیقی و غیرخطی (∩ شکل) یا به عبارتی پدیده درانگیختن است؛ در تیمار ۵ میلی‌مولار، احتمالاً فعال‌سازی مسیرهای دفاعی مانند آنزیم‌های پاداکساینده، بهبود بهره‌وری آب و تغییرات هورمونی، موجب افزایش مقادیر شاخصها و بهبود رشد و زیست توده شده‌اند. به عبارت دیگر این واکنش نشان‌دهنده فعال شدن مسیرهای تنظیم تخصیص رشد در شرایط تنش اسمزی خفیف است. کاهش طول ریشه‌چه در این تیمارها نیز نشان‌دهنده آسیب به مریستم‌های ریشه‌ای است که با تجمع یون‌های سمی، افزایش فشار اسمزی و اختلال در هورمون‌های رشد ارتباط دارد. ریشه‌چه به عنوان اولین اندام در تماس با شوری، حساس‌ترین بخش نسبت به تنش است و آسیب آن منجر به کاهش جذب آب و مواد معدنی و تضعیف رشد کلی گیاهچه می‌شود.

این نتایج بر وجود مرز ظریفی بین تحریک رشد و آسیب ناشی از شوری تأکید دارند و نشان می‌دهند که حتی تنش خفیف می‌تواند تغییرات قابل توجهی در عملکرد فیزیولوژیکی ریحان ایجاد کند. شاخص تحمل به شوری (STI.TBI) در تیمار ۵ میلی‌مولار با مقدار ۲/۲۸ بیشترین بوده که حاکی از همین سازوکار است. در ۱۵ میلی‌مولار افزایش نسبی STI.TBI دیده شد اما از نظر آماری معنی‌دار نبود. در مقابل، در ۳۰ میلی‌مولار شاخص زیست‌توده به شدت کاهش یافته (۰/۶۴) که نشان‌دهنده ناتوانی گیاه در تحمل تنش شدید قلیایی است. تجمع یون‌های سمی، اختلال در تعادل یونی و فشار اسمزی بالا عوامل اصلی این کاهش شدید زیست‌توده هستند. نتایج نشان می‌دهد که شاخص زیست‌توده کل علاوه بر ارزیابی تحمل به شوری، قادر است اثرات درانگیختن در پاسخ به

[1]. Zhu



شکل ۱- شاخص تحمل به شوری (STI) صفات مختلف جوانه‌زنی و رشد ریحان تحت تأثیر غلظت‌های متفاوت Na_2CO_3

مقادیر STI بالاتر از ۱ نشان‌دهنده تحمل بهتر و عملکرد برتر در مواجهه با تنش شوری است. نتایج نشان می‌دهد که تیمار ۵ میلی‌مولار Na_2CO_3 بیشترین افزایش را در این شاخص‌ها به‌ویژه در زیست‌توده کل و وزن‌تر کل داشته و تأثیر مثبتی بر رشد ریحان در شرایط شوری خفیف دارد. در مقابل، غلظت ۳۰ میلی‌مولار اثر بازدارنده قابل‌توجهی بر شاخص‌های تحمل داشته است.

Figure 1. Salt Tolerance Index (STI) of various germination and growth traits in basil as affected by different concentrations of Na_2CO_3.

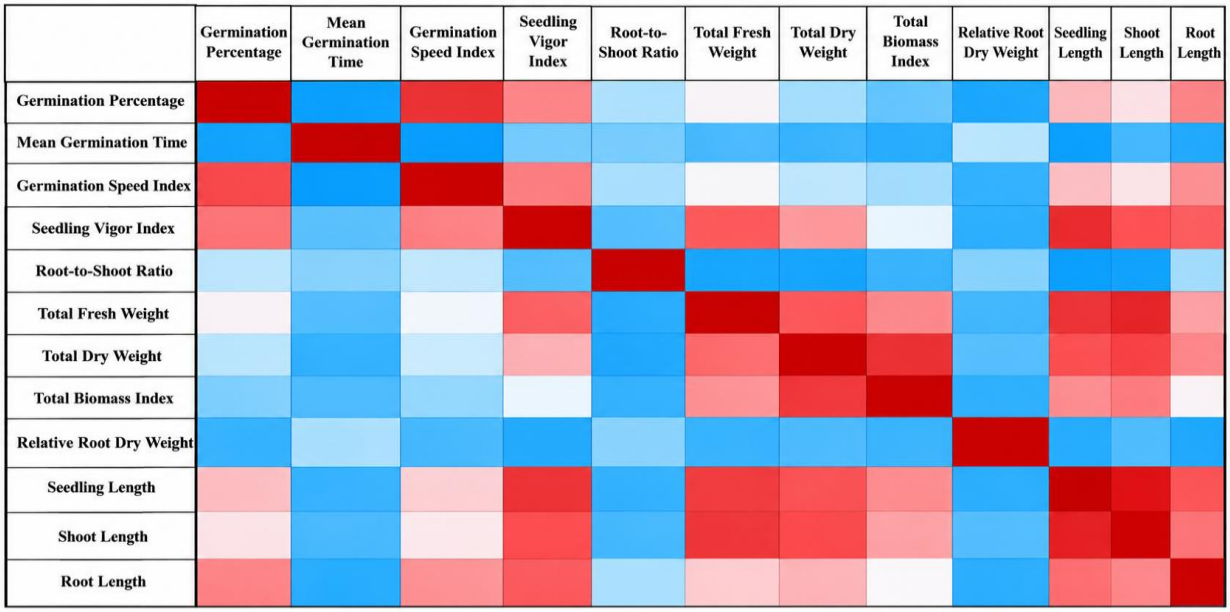
STI values greater than 1 represent enhanced tolerance and superior performance under saline conditions. The results indicate that the 5 mM Na_2CO_3 treatment led to the most significant increase in these indices—particularly for Total Biomass and Total Fresh Weight—reflecting a promotive effect on basil growth under mild alkalinity (hormetic response). In contrast, the 30 mM concentration exerted a substantial inhibitory effect on all tolerance indicators.

سطوح پایین تنش شوری را نیز نشان دهد. استفاده کنترل‌شده از غلظت‌های شوری در کشاورزی می‌تواند به عنوان راهکاری برای تحریک رشد و افزایش بهره‌وری مطرح شود.

نتایج حاصل از شاخص تحمل به شوری نشان داد (شکل ۱)، که تیمار ۵ میلی‌مولار کربنات سدیم باعث افزایش معنادار مقادیر STI در صفاتی مانند وزن تر کل (STI.TWW = 1.60)، وزن خشک کل (STI.TDW = 1.57)، زیست‌توده کل (STI.TBI = 2.28) و طول گیاه (STI.PLM = 1.40) گردید.

این مقادیر نه تنها از عدد ۱ فراتر رفتند بلکه در برخی موارد بیش از دو برابر مقدار شاهد افزایش نشان دادند که تایید کننده وقوع پدیده درانگیختن در شرایط شوری ملایم است. در ریحان، این پاسخ مثبت به ویژه از طریق افزایش تولید زیست‌توده، رشد طولی و عملکرد وزنی گیاهچه آشکار گردید و با سازوکارهایی همچون بهبود جذب آب، حفظ تعادل یونی، افزایش سطح پرولین، فعال‌سازی سامانه‌های پاداکسیدانی و بازتنظیم تعادل هورمونی مرتبط است. (اشرف[1]، ۲۰۰۹ ; گوپتا و هوانگ[2]، ۲۰۱۴). برخلاف آن در تیمار ۳۰ میلی مولار کربنات سدیم افت قابل توجه با اختلال در تعادل یونی (تجمع یون‌های سمی Na^+ و کاهش یون‌های ضروری مانند K^+و Ca^{2+})، تخریب ساختارهای سلولی، کاهش کارایی فرآیندهای فتوسنتزی و افزایش تولید انواع فعال اکسیژن (ROS[3]) همراه است. این شرایط موجب کاهش توانایی گیاه در حفظ ساختار و عملکرد طبیعی بافت‌های رشدی و اختلال در مسیرهای متابولیکی حیاتی می‌شود. بنابراین، کاهش شاخص STI به کمتر از ۰/۵ به عنوان نشانگر ورود به آستانه تحمل گیاه و آغاز اثرات سمی تنش شوری تفسیر می‌شود. در مجموع، مقایسه شاخص‌های STI در

1. Ashraf
2. Gupta & Huang
3. Reactive Oxygen Species



شکل ۲- نقشه حرارتی همبستگی پیرسون بین شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد اولیه ریحان
اعداد داخل هیت‌مپ نشان‌دهنده ضرایب همبستگی پیرسون (r) هستند. مقادیر قرمز پررنگ ( ) نشان‌دهنده همبستگی مثبت قوی ($r > 0.8$) و مقادیر آبی پررنگ ( ) نشان‌دهنده همبستگی منفی قوی ($r < -0.8$) می‌باشند.

Figure 2. Pearson correlation heatmap between germination and early growth indices of basil.
The numerical values within the heatmap represent Pearson correlation coefficients (r). Dark red shades ( ) signify a strong positive correlation ($r > 0.8$), while dark blue shades ( ) represent a strong negative correlation ($r < -0.8$).

سطوح مختلف شوری، این شاخص را به عنوان ابزاری دقیق و حساس برای تعیین دامنه تحمل گیاه ریحان معرفی می‌کند که می‌تواند بازه پاسخ‌های تطبیقی (تحریک رشد) را از محدوده آسیب‌های فیزیولوژیکی و کاهش عملکرد متمایز سازد.

این یافته‌ها با گزارش‌های مشابه در گیاهان دارویی دیگر مانند نعناع (*Mentha spp.*) و کاهوی کوهی (*Lactuca serriola*) همسو است، که در آن‌ها نیز تنش شوری ملایم موجب تحریک رشد و شوری شدید منجر به کاهش شدید شاخص‌های رشدی شده است (خورشید[1] و همکاران، ۲۰۲۵؛ پاریدا و داس[2]، ۲۰۰۵).

تحلیل نتایج نقشه حرارتی (Heatmap)

تحلیل همبستگی متغیرهای آزمایش حاضر نشان‌دهنده شبکه پیچیده‌ای از تعاملات فیزیولوژیکی بین شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد اولیه ریحان تحت تأثیر کربنات سدیم بود (شکل ۲). نتایج تحلیل همبستگی پیرسون، روابط قوی و معنادار بین شاخص‌های مختلف را در سطح ۱ درصد تأیید کرد که از اعتبار علمی داده‌ها حکایت دارد.

همبستگی بسیار قوی و مثبت بین درصد جوانه‌زنی و شاخص سرعت جوانه‌زنی ($r = 0.962$، $P<0.001$) مشاهده شد. همچنین رابطه منفی بسیار شدید با میانگین زمان جوانه‌زنی ($r = -0.987$، $P<0.001$) نشان داد که بذور با درصد جوانه‌زنی بالاتر، سریع‌تر نیز رشد می‌کنند. این الگو با مطالعات نخ زری مقدم و جهانگیری[3] (۲۰۱۰) بر روی مرزه، ریحان و بادرنجبویه تأیید شد که نشان داد این شاخص‌ها مکمل یکدیگرند.

در مورد شاخص‌های رشد و زیست‌توده، همبستگی بسیار قوی بین وزن تر کل (TFW) و وزن تر ساقه ($r = 0.935$، $P<0.001$) مشاهده شد. مطابق با نتایج حسنی (۲۰۰۵) در بررسی گیاهان دارویی، در این تحقیق نیز ساقه به‌عنوان مؤلفه اصلی وزن تر گیاهچه ریحان شناسایی

[1]. Khurshid
[2]. Parida and Das
[3]. Nakhzari Moghadam & Jahangiri

شد. به علاوه، همبستگی مثبت و قوی (r = 0.850) در سطح معناداری کمتر از ۰/۰۰۱ بین TDW و وزن خشک ریشه، نشان‌دهنده واکنش گیاه به تنش از طریق تمرکز بر گسترش ریشه است.

نکته حائز اهمیت در یافته‌های حاضر، همبستگی منفی میان نسبت ریشه به ساقه و وزن تر کل (r = -0.603) است. این الگو نشان می‌دهد که تیمارهای مختلف کربنات سدیم، موجب تغییر در نحوه توزیع زیست‌توده شده‌اند؛ به طوری که در غلظت‌های بالاتر، گیاه احتمالاً با هدف سازگاری، رشد ریشه را نسبت به ساقه اولویت داده است. در همین راستا، انتشاری و حاج باقری[1] (۲۰۱۱) در بررسی اثر تنش شوری بر گیاه ریحان گزارش کردند که با افزایش سطح تنش، رشد ساقه‌چه کاهش می‌یابد، اما در سطوح شوری صفر تا ۷۵ میلی‌مولار کلرید سدیم، رشد ریشه‌چه روند افزایشی داشته است. هرچند در سطوح شدید تنش (۱۵۰ میلی‌مولار)، رشد ریشه‌چه نیز با کاهش شدیدی مواجه شده است. این یافته با سازوکارهای تنش‌پذیری گیاهی در مواجهه با تنش‌های یونی نیز همخوانی دارد. تحلیل همبستگی میان متغیرهای مورد مطالعه، وجود هم‌خطی میان پارامترهای مرتبط را نشان داد که از نظر فیزیولوژیک پدیده‌ای طبیعی و قابل پذیرش در ارزیابی جوانه‌زنی محسوب می‌شود. همبستگی منفی و بسیار قوی میان میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT) و شاخص سرعت جوانه‌زنی ($r = -0.916$) نشان می‌دهد که این دو شاخص، جنبه‌های مکمل قدرت بذر را ارزیابی می‌کنند و ماهیت تکراری ندارند؛ به‌گونه‌ای که با کاهش زمان لازم برای جوانه‌زنی، سرعت استقرار گیاهچه افزایش می‌یابد. این الگوی همبستگی با مطالعات پیشین همخوانی دارد که سرعت بیشتر جوانه‌زنی را یکی از مؤلفه‌های اصلی قدرت بذر و عاملی مؤثر در استقرار موفق گیاهچه معرفی کرده‌اند (رید[2] و همکاران، ۲۰۲۲). افزون بر این، همبستگی مثبت بین طول ساقه‌چه و طول کل گیاهچه (r = 0.794) نشان‌دهنده هماهنگی بیومتریک در رشد بخش‌های مختلف گیاهچه است. این یافته با نتایج حسنی[3] (۲۰۰۵) در بررسی خصوصیات جوانه‌زنی گیاه ریحان، که بر هماهنگی رشد اجزای گیاهچه تحت شرایط تنش تأکید داشت، همخوانی دارد.

روابط منفی بین نسبت ریشه به ساقه و طول ریشه (r = -0.422) نیز نشان‌دهنده این است که تحت شرایط مختلف تیمار، ممکن است گیاهان اولویت رشد متفاوتی داشته باشند. این یافته با تحلیل همبستگی فیزیولوژیکی گیاهان دارویی همخوانی دارد که نشان داد توزیع رشد می‌تواند تحت تأثیر شرایط محیطی تغییر کند (حسنی، ۲۰۰۵). به طور کلی نقشه حرارتی همبستگی حاضر نشان داد که کربنات سدیم تأثیرات چندوجهی بر فیزیولوژی ریحان دارد. از یک سو، شاخص‌های جوانه‌زنی با هم سازگاری قوی دارند و از سوی دیگر، توزیع زیست‌توده بین ریشه و ساقه تحت تأثیر تیمارها تغییر می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که برای ارزیابی کامل اثر کربنات سدیم، باید هر سه جنبه جوانه‌زنی، رشد رویشی و توزیع زیست‌توده را همزمان در نظر گرفت.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در این مطالعه نشان داد که دو مؤلفه اول، به ترتیب ۷۵/۸۵ درصد و ۲۱/۸۹ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند (جدول ۳)، که در مجموع ۹۷/۷۵ درصد از تغییرات میان صفات مختلف را پوشش می‌دهند. این سهم بسیار بالا از واریانس تبیین‌شده، کارایی و قابلیت اعتماد تحلیل PCA را در شناسایی الگوهای همبستگی و تمایز تیمارها به‌خوبی اثبات می‌کند. همچنین، مؤلفه‌های چهارم و پنجم دارای مقادیر بسیار کوچک و منفی بودند که ناشی از خطاهای عددی در محاسبات سیستم بوده و از نظر آماری قابل صرف‌نظر کردن هستند.

نمودار Biplot (شکل ۳) حاصل از این تحلیل نشان داد که صفاتی همچون درصد جوانه‌زنی بذر(GP)، شاخص بنیه گیاهچه (SVI)، وزن خشک کل (TDW)، شاخص زیست‌توده کل (TBI) و میانگین طول گیاه (PLM)، نقش مهمی در تمایز تیمارها ایفا کرده‌اند. تیمار شاهد و تیمار ۵ میلی‌مولار کربنات سدیم (شوری) در راستای مثبت مؤلفه اول قرار گرفته و بیشترین همبستگی را با صفات مذکور نشان دادند. این موضوع بیانگر آن است که سطوح پایین شوری نه‌تنها موجب کاهش عملکرد صفات رشدی و جوانه‌زنی نشده، بلکه در برخی موارد موجب بهبود آن‌ها نیز شده است. چنین پدیده‌ای که با عنوان

[1]. Enteshari & Hajbagheri
[2]. Reed
[3]. Hasani

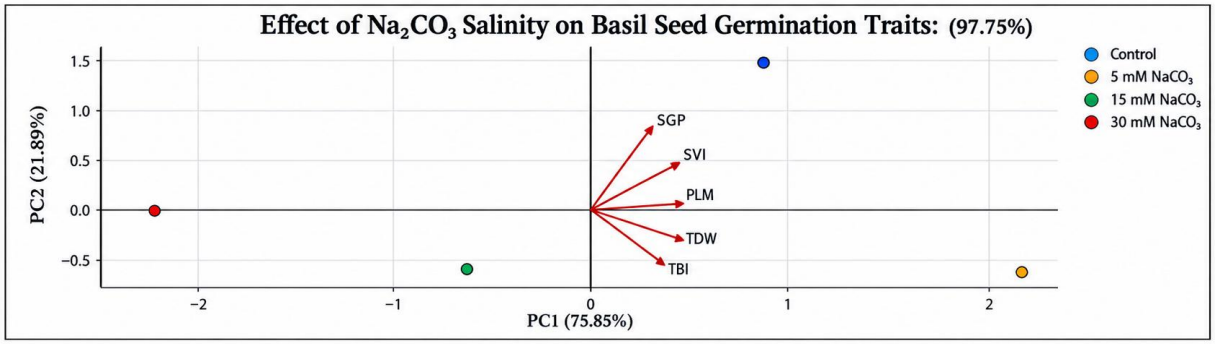
جدول ۳- نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی: مقدار ویژه، درصد واریانس تبیین‌شده و درصد تجمعی هر مؤلفه

Table 3. Results of Principal Component Analysis (PCA): Eigenvalues, percentage of explained variance, and cumulative variance for each component.

مولفه‌های اصلی **Principal Component**	مقادیر ویژه **Eigenvalue**	درصد واریانس **Variance (%)**	درصد واریانس تجمعی **Cumulative Variance (%)**
مولفه اول PC1	3.79	75.85	75.85
مولفه دوم PC2	1.09	21.89	97.75
مولفه سوم PC3	0.11	2.25	100.00

این جدول خلاصه‌ای از نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی را ارائه می‌دهد. بر اساس مقادیر ویژه، مؤلفه‌های اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۷۵/۸۵ درصد و ۲۱/۸۹ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند. در مجموع، این دو مؤلفه ۹۷/۷۵ درصد از تغییرات موجود در داده‌ها را پوشش می‌دهند.

This table summarizes the results of the Principal Component Analysis (PCA). Based on the eigenvalues, the first and second principal components (PC1 and PC2) explain 75.85% and 21.89% of the total variance, respectively. Collectively, these two components account for 97.75% of the total variation in the data.



شکل ۳- نمودار Biplot تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای بررسی تأثیر شوری کربنات سدیم بر صفات جوانه‌زنی و رشد ریحان

نمودار Biplot نشان‌دهنده توزیع تیمارهای مختلف (کنترل، ۵، ۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار Na_2CO_3) بر اساس دو مؤلفه اول تحلیل PCA است. فلش‌ها نمایانگر صفات کلیدی با بار بالا هستند که بیشترین تأثیر را در تمایز تیمارها دارند. تیمار کنترل و ۵ میلی‌مولار به سمت صفات مثبت رشد مانند درصد جوانه‌زنی(GP) ، وزن خشک کل (TDW) و شاخص زیست‌توده کل (TBI) متمایل‌اند، در حالی که تیمار ۳۰ میلی‌مولار بیشترین فاصله و تأثیر منفی بر رشد و جوانه‌زنی را نشان می‌دهد.

Figure 3. PCA Biplot illustrating the effects of sodium carbonate (Na_2CO_3) salinity on germination and growth traits of basil.

The Biplot displays the distribution of treatments (Control, 5, 15, and 30 mM Na_2CO_3) based on the first two principal components. Arrows represent key traits with high loadings, which have the greatest influence on treatment differentiation. The Control and 5 mM treatments are clustered towards positive growth traits, such as Germination Percentage (GP), Total Dry Weight (TDW), and Total Biomass Index (TBI). Conversely, the 30 mM treatment shows the greatest distance from these traits, indicating a significant inhibitory impact on growth and germination.

"تحریک ناشی از تنش خفیف" یا درانگیختن شناخته می‌شود، پیش‌تر نیز در گیاهان مختلف گزارش شده است(کالابرس و بالدوین[1]، ۲۰۰۳).

علاوه بر این، نتایج به‌دست‌آمده از شاخص تحمل به شوری (STI) نیز کاملاً در هماهنگی با یافته‌های تحلیل PCA قرار داشتند؛ این یافته‌ها با نتایج گزارش‌شده ماهاجان و تونجا در خصوص پاسخ‌های دوگانه گیاهان به سطوح مختلف تنش شوری نیز هم‌راستا هستند (ماهاجان و توتجا[2]، ۲۰۰۵). مجموعه یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تأثیر کربنات سدیم بر جوانه‌زنی و رشد اولیه بذر ریحان به صورت یک پاسخ غیرخطی و دو مرحله‌ای موسوم به «درانگیختن» بروز می‌کند. این موضوع نمایانگر فعال‌سازی سازوکارهای فیزیولوژیکی و متابولیکی تطبیقی است که به گیاه امکان مقاومت در برابر تنش خفیف و

[1]. Calabrese & Baldwin

[2]. Mahajan & Tuteja

حتی تحریک رشد را می‌دهد (کالابرس و بالدوین، ۲۰۱۱). اما با افزایش غلظت کربنات سدیم به ۱۵ و ۳۰ میلی‌مولار، موجب اختلال در جذب آب و مواد مغذی، سمیت یونی و آسیب به ساختارهای سلولی و آنزیمی مرتبط با رشد می‌شود (بیولی و همکاران، ۲۰۱۳). در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که کربنات سدیم در غلظت پایین با تحریک مسیرهای متابولیکی و تنظیمی، اثرات مثبت موقتی بر جوانه‌زنی و رشد اولیه ریحان دارد، اما افزایش غلظت آن به سرعت منجر به اختلالات فیزیولوژیکی و کاهش عملکرد گیاهچه می‌شود. این نتایج اهمیت تعیین دامنه‌های بهینه تنش شوری را در زراعت ریحان و سایر گیاهان حساس برجسته می‌سازد (شارما و همکاران، ۲۰۲۴؛ ژو، ۲۰۰۱).

نتیجه‌گیری

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ جوانه‌زنی بذر ریحان توده بومی دماوند به تنش ناشی از کربنات سدیم از الگوی دوفازی تبعیت می‌کند؛ به طوری که غلظت‌های پایین (۵ میلی‌مولار) با ایجاد پدیده درانگیختن، موجب بهبود شاخص‌های بنیه و زیست‌توده نسبت به شرایط شاهد می‌شود، در حالی که غلظت‌های فراتر از ۱۵ میلی‌مولار منجر به شکست کامل سامانه‌های متابولیک و توقف رشد می‌گردد. با توجه به تبیین بالای واریانس توسط تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) و همبستگی شدید بین سرعت جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه، می‌توان از این شاخص‌ها به عنوان سنجه‌های پیش‌بینی کننده تحمل در برنامه‌های اصلاحی استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود در مدیریت اراضی تحت تنش قلیایی، با بهره‌گیری از راهبردهای پیش‌تیمار ملایم، پتانسیل تطبیقی گیاه تحریک شود، هرچند که به دلیل بازه محدود تحمل ریحان، پایش دقیق غلظت نمک‌های کربناتی جهت جلوگیری از خسارات جبران‌ناپذیر در مراحل اولیه رشد الزامی است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: ابوحسن فرهنگ سردرودی، قاسمعلی عبدالهی کوشکی، علیرضا جمالی خرنجانی؛ تهیه گزارش پژوهش: ملیحه صادقی زاده، علی خطیبی؛ تحلیل داده‌ها: ابوحسن فرهنگ سردرودی

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه ملی مهارت، آموزشکده کشاورزی دماوند انجام شد.

سپاسگزاری

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه ملی مهارت – آموزشکده دماوند به‌دلیل حمایت مالی و همکاری در اجرای این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌کنند. همچنین از داوران گمنام مجله به‌پاس نظرات سازنده و پیشنهادهای ارزشمندشان که به ارتقای کیفیت این مقاله کمک کرد، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

References منابع

Alirezaei Noghondar, M., Azizi, M., & Valizadeh Ghalebik, A. (2013). Study of salinity stress effects on seed germination traits and seedling growth of four improved medicinal Basil cultivars. *Seed Research*, *2*(4), 44–56. [In Persian]

Ashraf, M. (2009). Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. *Biotechnology Advances*, *27*(1), 84–93. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.003

Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H., & Nonogaki, H. (2013). *Dormancy and the Control of Germination*. In: Seeds. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4_6

Calabrese, E. J., & Baldwin, L. A. (2002). Defining hormesis. Human & Experimental Toxicology, 21(2), 91–97. https://doi.org/10.1191/0960327102ht217oa

Calabrese, E. J., & Baldwin, L. A. (2003). Hormesis: The dose-response revolution. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, *43*, 175–197. https://doi.org/10.1146/annurev.pharmtox.43.100901.140223

Calabrese, E. J., & Baldwin, R. B. (2011). The hormesis database: The occurrence of hormetic dose responses in the toxicological literature. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, *61*(1), 73–81. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2011.06.003

Çamlıca, M., & Yaldız, G. (2017). Effect of salt stress on seed germination, shoot and root length in basil (*Ocimum basilicum*). *International Journal of Secondary Metabolite*, *4*(3, S1), 69–76. https://doi.org/10.21448/ijsm.356250

Enteshari, S., & Hajbagheri, S. (2011). Effects of mycorrhizal fungi on some physiological characteristics of salt stressed *Ocimum basilicum* L. *Iranian Journal of Plant Physiology*, *1*(4), 271-274.

Fernandez, G. C. J. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. Asian Vegetable Research and Development Center. https://doi.org/10.22001/WVC.72511

Feyz Abasi, P., Amirinejad, A. A. & Ranjbar, F. (2024). Effect of biochar and humic acid on reducing alkalinity stress in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *55*(7), 1113-1127. [In Persian] https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371418.669650

Guo, R., Shi, L., & Yang, Y. (2009). Germination, growth, osmotic adjustment and ionic balance of wheat in response to saline and alkaline stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, *55*(5), 667-679. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00406.x

Gupta, B., & Huang, B. (2014). Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*, *2014*(1), 1–18. https://doi.org/10.1155/2014/701596

Hasani, A. (2005). Effect of PEG induced water stress on seed germination characteristics of Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *21*(4), 535-543. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijmapr.2006.115034

Jahanbakhsh, S., Parmoon, A., Azadqoujeh Beigloo, R., & Ghataei, M. (2019). Modeling hydrotime and determining tolerance thresholds to salinity and drought during germination of different basil (*Ocimum basilicum*) species. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *7*(2), 119–142. [In Persian] https://doi.org/10.22034/ijsst.2019.109228.1056

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202

Khammari, I., Sarani, S. & Dahmardeh, M. (2007). The effect of salinity on seed germination and growth in six medicinal plants. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *23*(3), 331-339. [In Persian]

Khorshidi, J. (2020). Comparison of salinity tolerance of basil, *Denaee thyme*, Hyssop and *Moldavian balm* medicinal plants seeds based on germination characteristics. *Environmental Stresses in Crop Science*, *13*(1), 251-261. [In Persian] https://doi.org/10.22077/escs.2019.1848.1437

Khurshid, R., Perveen, S., Hafeez, M.B., Niaz, A. and Zarbakhsh, S. (2025). Combined application of plant growth promoting rhizobacteria and kinetin on maize growth, chlorophyll, osmoregulation, and oxidative metabolism under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *25*(2), 4295-4311. https://doi.org/10.1007/s42729-025-02397-w

Li, J., & Yang, Y. (2023). How do plants maintain pH and ion homeostasis under saline-alkali stress? *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1217193. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1217193

MacDonald, M. T., & Mohan, V. R. (2025). Chemical seed priming: molecules and mechanisms for enhancing plant germination, growth, and stress tolerance. *Current Issues in Molecular Biology*, *47*(3), 177. https://doi.org/10.3390/cimb47030177

Mahajan, S., & Tuteja, N. (2005). Cold, salinity and drought stresses: An overview. Archives of Biochemistry and Biophysics, 444(2), 139–158. https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.10.018

Moameni, A. (2011). Geographical distribution and salinity levels of soil resources of Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, *24*(3), 203-215. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijsr.2011.126633

Nakhzari Moghaddam, A., & Jahangiri, A. (2010). The effect of salt stress on germination percentage and speed of medicinal plants. In National Conference on Medicinal Plants. Scientific Information Database (SID). https://sid.ir/paper/820955/fa [In Persian]

Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *60*(3), 324–349. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010

Pannacci, E., Baratta, S., Falcinelli, B., Farneselli, M., & Tei, F. (2022). Mugwort (*Artemisia vulgaris* L.) Aqueous extract: Hormesis and biostimulant activity for seed germination and seedling growth in vegetable crops. *Agriculture*, *12*(9), 1329. https://doi.org/10.3390/agriculture12091329

Rajabi Dehnavi, A., Zahedi, M., Ludwiczak, A., Cardenas Perez, S., & Piernik, A. (2020). Effect of salinity on seed germination and seedling development of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) genotypes. *Agronomy*, *10*(6), 859. https://doi.org/10.3390/agronomy10060859

Reed, R. C., Bradford, K. J., & Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*, *128*(6), 450-459. https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2

Sharma, M., Tisarum, R., Kohli, R. K., Batish, D. R., Cha-Um, S., & Singh, H. P. (2024). Inroads into saline-alkaline stress response in plants: Unravelling morphological, physiological, biochemical, and molecular mechanisms. *Planta*, *259*(6), 130. https://doi.org/10.1007/s00425-024-04368-4

Shi, D., & Sheng, Y. (2005). Effect of various salt–alkaline mixed stress conditions on sunflower seedlings and analysis of their stress factors. *Environmental and experimental Botany*, *54*(1), 8-21. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.05.003

Talei, D., Saad, M. S., Yusop, M. K., AbdulKadir, M., & Valdiani, A. (2011). Effects of different surface sterilizers on seed germination and contamination of king of bitters (*Andrographis paniculata* Nees). *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, *10*(4), 639–643.

Yang, X., Baskin, J. M., Baskin, C. C., & Huang, Z. (2012). More than just a coating: ecological importance, taxonomic occurrence and phylogenetic relationships of seed coat mucilage. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, *14*(6), 434-442. https://doi.org/10.1016/j.ppees.2012.09.002

Zarandi Miandoab, L, & Adib Yengeje, T. (2019). Investigation of degradation process of *Zygophyllum fabago* L. seed reserves during germination under different pH. *Journal of Plant Process and Function*, *8*(30), 71-79. [In Persian]

Zhou, D., Barney, J. N., & Welbaum, G. E. (2022). Production, composition, and ecological function of sweet-basil-seed mucilage during hydration. *Horticulturae*, *8*(4), 327. https://doi.org/10.3390/horticulturae8040327

Zhu, J. K. (2001). Plant salt tolerance. Trends in Plant Science, 6(2), 66–71. https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01838-0