Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Soil Management and Sustainable Production

Print ISSN: 2322-1267
Online ISSN: 2322-1275

Evaluation of the effect of different levels of salinity stress and foliar spraying of spermine, spermidine and putrescine on seed yield and concentration of leaf and root nutrients in Camelina plant

Esmaeil Gholinezhad[*1], Bakhtiar Lalehgani[2], Shahryar Kazemi[3]

1. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran. E-mail: e_gholinejad@pnu.ac.ir
2. Assistant Prof., Dept. of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran. E-mail: lalehgani@pnu.ac.ir
3. Assistant Prof., Crop and Horticultural Science Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Sari, Iran. E-mail: sh.kazemi@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 02.11.2023
Revised: 06.15.2023
Accepted: 06.17.2023

Keywords:
Camelina,
Elements,
Polyamine,
Salt Stress,
Seed Yield,
Sodium

ABSTRACT

Background and Objectives: Soil salinity, especially in arid and semi-arid regions, is one factor limiting plant growth. Excessive accumulation of sodium and chloride ions leads to reduced growth and imbalance of nutrients. The use of exogenous polyamines, including putrescine, spermidine, and spermine, is considered as an effective method not only in determining their role in response to salinity, but also as a way to increase plant resistance to salinity. Camelina is an oilseed product of the Brassica family, which contains other bioactive compounds such as flavonoids and phenolic products and is a new source of essential fatty acids, especially omega-3 fatty acids. This study was conducted to evaluate the effect of different levels of sodium chloride and foliar spraying of spermine, spermidine, and putrescine on seed yield and the concentration of leaf and root nutrients in the Camelina plant.

Materials and Methods: The experiment was carried out in March 2022 as a factorial design based on a completely random design (CRD) in the form of pot culture with 12 treatments and 3 replications. The salinity stress treatment was with Urmia lake water at three levels (0, 15, 30 ds/m). Foliar treatment at 4 levels 1- Foliar spraying with spermine (2 mM), 2- Foliar spraying with spermidine (2 mM), 3- Foliar spraying with putrescine (2 mM) and control (no foliar spraying). The foliar spraying was done every 3 days (totally in 6 stages) after establishing three seedlings in the pot and reaching the four-leaf stage. At the end of the Camelina plant growth season, to calculate the seed yield, the seeds in the capsules of three plants in each pot were separated and weighed. Statistical analysis of data was done using SAS software (version 9.1) and MATATC, and the comparison of means was also done by Tukey's test at the five percent level. Also, Excel program was used to draw graphs.

Results: The results of this research showed that the salt stress at 30 and 15 ds/m levels compared to the treatment without salt decreased leaf potassium (52 and 17%), root potassium (44 and 37%), leaf magnesium (50 and 28%), root magnesium (56 and 24%), leaf zinc (58 and 47%), root zinc (39 and 29%), leaf iron (10 and 2%), root iron (57 and 23%), and seed yield (52 and 10%), but it increased the amount of leaf sodium (89 and 82%), root sodium (39 and 11%), leaf calcium (14 and 6%) and root calcium (76 and 28%), respectively. Also, salinity stress caused a decrease

in the ratio of potassium to sodium absorption but increased the ratio of calcium to the sum of sodium and potassium in the roots and leaves due to the increase in the amount of sodium and the decrease in potassium. At all salinity levels, foliar spraying with polyamines increased leaf and root potassium, leaf and root magnesium, leaf and root zinc, and leaf and root iron, by reducing the amount of sodium in leaves and roots. Also, foliar spraying with spermine, spermidine, and putrescine compared to no foliar spraying, increased the seed yield by 32, 8, and 21%, respectively.

Conclusion: The results of this research showed that foliar spraying with spermine, spermidine, and putrescine could moderate the effects of salinity stress and improve the seed yield of camellia under salinity stress conditions and it prevented excessive reduction in seed yield by improving the absorption of macro and microelements in roots and leaves and increasing the ratio of potassium to sodium and the ratio of calcium to total sodium and potassium in roots and leaves.

Cite this article: Gholinezhad, Esmaeil, Lalehgani, Bakhtiar, Kazemi, Shahryar. 2023. Evaluation of the effect of different levels of salinity stress and foliar spraying of spermine, spermidine and putrescine on seed yield and concentration of leaf and root nutrients in Camelina plant. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13 (3), 1-24.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/EJSMS.2023.21074.2089
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار

شاپا چاپی: ۱۲٦۷-۲۳۲۲

شاپا آنلاین: ۱۲۷۵-۲۳۲۲

ارزیابی اثر سطوح مختلف تنش شوری و برگ‌پاشی اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین بر عملکرد دانه و غلظت عناصر غذایی برگ و ریشه در گیاه کاملینا

اسماعیل قلی‌نژاد*[۱]، بختیار لله گانی[۲]، شهریار کاظمی[۳]

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علمی علوم کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران. رایانامه: e_gholinejad@pnu.ac.ir

۲. استادیار گروه علمی علوم کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران. رایانامه: lalehgani@pnu.ac.ir

۳. استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران. رایانامه: sh.kazemi@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۱۱/۲۲
تاریخ ویرایش: ۱٤۰۲/۰۳/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۲/۰۳/۲۷

واژه‌های کلیدی:
پلی‌آمین،
تنش شوری،
سدیم،
عملکرد دانه،
عناصر،
کاملینا

چکیده

سابقه و هدف: شوری خاک به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک یکی از عواملی است که رشد گیاهان را محدود می‌کند. تجمع بیش از حد یون‌های سدیم و کلرید منجر به کاهش رشد و عدم تعادل مواد مغذی می‌شود. استفاده از پلی‌آمین‌های اگزوژن، از جمله پوترسین، اسپرمیدین و اسپرمین به عنوان یک روش مؤثر نه تنها در تعیین نقش آن‌ها در پاسخ به شوری، بلکه به عنوان راهی برای افزایش مقاومت گیاه به شوری در نظر گرفته می‌شود. کاملینا یک محصول دانه روغنی از خانواده براسیکا است که حاوی سایر ترکیبات زیست‌فعال مانند فلاونوئیدها و محصولات فنلی و به عنوان منبع جدیدی از اسیدهای چرب ضروری، به ویژه اسیدهای چرب امگا ۳ است. این مطالعه با هدف ارزیابی اثر سطوح مختلف کلرید سدیم و برگ‌پاشی اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین بر عملکرد دانه و غلظت عناصر غذایی برگ و ریشه در گیاه کاملینا انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: آزمایش در اسفندماه سال ۱٤۰۰ به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی به صورت کشت گلدانی با ۱۲ تیمار و ۳ تکرار اجرا گردید. تیمار تنش شوری با آب دریاچه ارومیه در سه سطح (صفر، ۱۵، ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) بود. تیمار محلول‌پاشی در ٤ سطح ۱- محلول‌پاشی با اسپرمین (۲ میلی‌مولار)، ۲- محلول‌پاشی با اسپرمیدین (۲ میلی‌مولار)، ۳- محلول‌پاشی با پوترسین (۲ میلی‌مولار) و شاهد (عدم محلول‌پاشی) بود که زمان اعمال محلول‌پاشی بعد از استقرار سه گیاهچه در گلدان و رسیدن به مرحله چهار برگی هر ۳ روز یکبار (در مجموع در ٦ مرحله) انجام گرفت. در انتهای فصل رشد گیاه کاملینا برای محاسبه عملکرد دانه، بذرهای موجود در کپسول‌های سه بوته هر گلدان جدا و وزن گردید.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و MATATC انجام و مقایسه میانگین‌ها نیز توسط آزمون توکی در سطح پنج درصد انجام شد. هم‌چنین برای ترسیم نمودارها از برنامه Excel استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری به‌ترتیب پتاسیم برگ (۵۲ و ۱۷ درصد)، پتاسیم ریشه (٤٤ و ۳۷ درصد)، منیزیم برگ (۵۰ و ۲۸ درصد)، منیزیم ریشه (٥٦ و ٢٤ درصد)، روی برگ (۵۸ و ٤٧ درصد)، روی ریشه (۳۹ و ۲۹ درصد)، آهن برگ (۱۰ و ۲ درصد)، آهن ریشه (۵۷ و ۲۳ درصد) و عملکرد دانه را (۵۲ و ۱۰ درصد) کاهش داد ولی مقدار سدیم برگ (۸۹ و ۸۲ درصد)، سدیم ریشه (۳۹ و ۱۱ درصد)، کلسیم برگ (١٤ و ٦ درصد) و کلسیم ریشه را (٧٦ و ۲۸ درصد) افزایش داد. هم‌چنین تنش شوری به دلیل افزایش مقدار سدیم و کاهش پتاسیم باعث کاهش نسبت جذب پتاسیم به سدیم شد ولی نسبت کلسیم به مجموع سدیم و پتاسیم ریشه و برگ را افزایش داد. در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها با کاهش مقدار سدیم برگ و ریشه باعث افزایش مقدار پتاسیم برگ و ریشه، منیزیم برگ و ریشه، روی برگ و ریشه، آهن برگ و ریشه شد. هم‌چنین محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین، در مقایسه با بدون محلول‌پاشی، به‌ترتیب عملکرد دانه را به میزان ۳۲، ۸ و ۲۱ درصد افزایش داد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین با بهبود جذب عناصر پرمصرف و کم‌مصرف ریشه و برگ، افزایش نسبت پتاسیم به سدیم و نسبت کلسیم به مجموع سدیم و پتاسیم ریشه و برگ توانست اثرات تنش شوری را تعدیل داده و باعث بهبود عملکرد دانه کاملینا در شرایط تنش شوری شد و از کاهش بیش از حد عملکرد دانه جلوگیری کرد بنابراین محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها به عنوان راهکاری مؤثر در کاهش خسارت ناشی از تنش شوری در گیاه کاملینا معرفی می‌گردد.

استناد: قلی‌نژاد، اسماعیل، لله گانی، بختیار، کاظمی، شهریار (۱۴۰۲). ارزیابی اثر سطوح مختلف تنش شوری و برگ‌پاشی اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین بر عملکرد دانه و غلظت عناصر غذایی برگ و ریشه در گیاه کاملینا. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۳ (۳)، ۲۴-۱.

DOI: 10.22069/EJSMS.2023.21074.2089

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

شوری خاک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک یکی از عواملی است که رشد و بهره‌وری گیاهان را محدود می‌کند. خاک‌هایی با قابلیت هدایت الکتریکی بالاتر از ٤ دسی‌زیمنس بر متر به عنوان خاک‌های شور در نظر گرفته می‌شوند و بیش از ٦ درصد از کل زمین‌های قابل کشت در سراسر جهان به عنوان خاک شور طبقه‌بندی می‌شوند (۱). برای رویارویی با مشکل شوری، گیاهان زراعی معمولاً رویکردهای مختلفی را اجرا می‌کنند. اثر اسمزی نمک‌های موجود در محلول خاک، جذب آب را برای گیاهان دشوار می‌کند. قسمت‌های ساقه معمولاً در مقایسه با ریشه بیش‌تر تحت‌تأثیر نمک قرار می‌گیرند (۲). هنگامی که گیاهان در معرض شرایط تنش شوری قرار می‌گیرند، غلظت گونه‌های فعال اکسیژن مانند سوپراکسید، پراکسید هیدروژن، اکسیژن منفرد و رادیکال هیدروکسیل در داخل گیاه افزایش می‌یابد (۳). افزایش سطوح گونه‌های فعال اکسیژن به لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و مولکول‌های اسید نوکلئیک آسیب می‌رساند و پیری گیاه را تسریع می‌کند و هم‌چنین آسیب به لیپیدها در ساختارهای غشایی باعث افزایش نشت یون از سلول‌ها می‌شود (٤). در دسترس بودن ریزمغذی‌ها (مس، آهن، منگنز، مولیبدن و روی) تحت‌تأثیر شوری قرار می‌گیرد که در خاک‌های شور و سدیم مشهود است. با این‌حال، نوع گیاه، بافت گیاهی، شرایط رشد، غلظت ریزمغذی‌ها، سطح شوری و ترکیب آن، تأثیر تنش شوری را بر در دسترس بودن ریزمغذی‌ها تعیین می‌کند (۵). به‌طور مشابه، نظرات متضادی توسط دانشمندان مربوط به غلظت روی، آهن، مولیبدن و مس ارائه شده است. سمیت یونی به‌دلیل اثرات نامطلوب بر برخی فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ضروری منجر به کاهش رشد می‌شود (٦). کلرید، سدیم، بور، لیتیوم و غیره یون‌های اصلی هستند که در صورت تجمع بیش از حد در فرآیندهای متابولیک گیاه اختلال ایجاد می‌کنند. در نتیجه شوری، گیاهان در مکانیسم جذب یون خود به‌دلیل سازگاری‌های متعدد با یون‌های سمی که هم‌زمان در یک گیاه خاص عمل می‌کنند، متفاوت هستند. تحمل به نمک گونه‌های گیاهی به توانایی آن در محدود کردن انتقال یون‌های سمی در اندام‌های هوایی اشاره دارد (۷). تجمع بیش از حد یون‌های سدیم و کلرید منجر به کاهش رشد و عدم تعادل مواد مغذی می‌شود. افزایش غلظت سدیم در محلول خاک باعث کاهش جذب کلسیم و پتاسیم می‌شود. با این‌حال، کلسیم و پتاسیم برای یکپارچگی غشاء و جداسازی مناسب اهمیت کلیدی دارند (۵). گیاهان سازوکاری را برای حفظ غلظت کافی کلسیم و پتاسیم در سطح سلولی در شرایط شور اتخاذ می‌کنند. نسبت کلسیم به سدیم در محیط کشت شور با افزایش غلظت کلسیم به منظور افزایش تحمل به نمک حفظ می‌شود (۸). تحت تنش نمک، غلظت پتاسیم کاهش می‌یابد. در صورت وجود بیش از حد سدیم، پتاسیم از بخش تبادل خاک خارج می‌شود. بنابراین، یک رقابت بین سدیم و پتاسیم در بخش مشترک خاک و ریشه ایجاد می‌شود (۸). گیاهان متأثر از نمک به دلیل غلظت کم منیزیم در مجتمع تبادلی، غلظت منیزیم برگ پایینی دارند. افزایش کلسیم (با افزودن کلسیم به‌صورت سولفات کلسیم) با جابجایی منیزیم از کمپلکس خاک یک اثر رقابت ایجاد می‌کند و در نتیجه غلظت منیزیم را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، تجمع بالای سدیم یک رابطه رقابت با جذب نیتروژن، پتاسیم و منگنز نشان می‌دهد. شوری منجر به غلظت بالای فسفر و محتوای کم منیزیم می‌شود (۹). در شرایط شور، قطب‌زدایی[1] غشای سلولی توسط یون‌های سدیم ورود پتاسیم توسط کانال‌های اصلاح‌کننده به داخل را محدود

1- Depolarization

می‌کند و نشت پتاسیم را با فعال‌سازی کانال‌های اصلاح‌کننده پتاسیم به بیرون افزایش می‌دهد (۱۰). شوری هم‌چنین ناقلین یون و عملکردهای حامل مربوط به جذب آهن در سلول‌های ریشه گیاه را مختل می‌کند (۱۱). تنش شوری مانع از فعالیت اکوفیزیولوژیکی، فتوسنتزی و ضد اکسیدانی وابسته به عنصر روی در گیاهان می‌شود (۱۲). شایع‌ترین اثر کمبود روی در شرایط شوری شامل تجمع یون‌های نمک (سدیم و کلرید) در اندام‌های مختلف گیاه است (۱۳). گزارش شده است که تنش شوری غلظت کلسیم و آهن را در غده‌های همه ارقام سیب زمینی کاهش داد زیرا شوری باعث عدم تعادل تغذیه‌ای به‌دلیل کاهش جذب و انتقال مواد مغذی به اندام هوایی می‌شود (۱٤). در این رابطه، پژوهش‌گران دیگری نیز گزارش کردند که تنش شوری باعث عدم تعادل قابل توجه عنصر روی در سلول‌های گیاهی می‌شود که متابولیسم طبیعی گیاه را مختل می‌کند (۱۵). پژوهش‌گران بیان کردند که تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار میزان پتاسیم، فسفر، آهن، مس و منگنز برگ ذرت گردید (۱٦).

پلی‌آمین‌ها، از جمله پوترسین، اسپرمیدین و اسپرمین گروه‌های نیتروژن‌دار آلیفاتیک با جرم مولکولی کم هستند. آن‌ها به فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مختلف درگیر در رشد گیاه کمک می‌کنند (۱۷). اثر پلی‌آمین‌ها بر روی گونه‌های مختلف گیاهی تحت تنش غیرزیستی گزارش شده است (۳ و ۱۸). استفاده از پلی‌آمین‌های خارجی به عنوان یک روش مؤثر نه تنها در تعیین نقش آن‌ها در پاسخ به شوری، بلکه به عنوان راهی برای افزایش تحمل گیاه به شوری در نظر گرفته می‌شود (۱۹). پلی‌آمین‌ها بر رشد گیاهان تأثیر مثبت دارند که احتمالاً می‌تواند به اثرات پلی‌آمین‌ها بر افزایش تقسیم سلولی، محتوای پرولین و افزایش سطوح هومون‌های گیاهی مانند اکسین، جیبرلین و هم‌چنین کاهش سطح آبسیزیک اسید مربوط باشد (۲۰). نتایج مطالعه‌ای نشان داد که پلی‌آمین‌ها ممکن است با کاهش آسیب‌های واکنش‌های ترکیب با اکسیژن و افزایش فعالیت آنزیم‌ها، تحمل گیاه گل همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) را به تنش شوری افزایش دهند (۲۱). در آزمایشی گزارش شد که کاربرد اسپرمین خارجی (۱ میلی‌مولار) در طول تنش، تحمل به تنش شوری را در گیاه کاملینا بهبود می‌بخشد و مطالعات قبلی در مورد نقش محافظتی اسپرمین در برابر تنش شوری را تأیید می‌کند (۱).

کاملینا (*Camelina sativa* L.)، (کتان کاذب یا طلای لذت) یک محصول دانه روغنی از خانواده براسیکا است که حاوی سایر ترکیبات زیست‌فعال مانند فلاونوئیدها و محصولات فنلی و به عنوان منبع جدیدی از اسیدهای چرب ضروری، به ویژه اسیدهای چرب امگا ۳ است (۲۲، ۲۳ و ۲٤). کاملینا تحمل به خشکی، شوری و سرما را افزایش داده است، زودرس بوده و در مقایسه با سایر محصولات دانه روغنی به نهاده‌های کم‌تری نیاز دارد. توانایی سازگاری به خشکسالی با توسعه سیستم‌های ریشه عمیق یا ایجاد تنظیمات متابولیک، ویژگی مشترک تحمل به خشکی و شوری است (۲۵). کاملینا یک گیاه روغنی با ارزش برای انسان و حیوانات است که حاوی تعداد زیادی مواد شیمیایی گیاهی مانند ویتامین، فنل، فلاونوئید، کاروتنوئید، چربی و سطوح بالای اسید چرب و امروزه به عنوان منبع بیودیزل برای جت و خطوط هوایی استفاده می‌شود (۲٦). با توجه به اهمیت گیاه کاملینا از نظر تأمین روغن و پروتئین مورد نیاز و وجود تنش شوری در کشور، استفاده از تیمارهای کاهش‌دهنده و تعدیل‌کننده اثرات تنش شوری (مانند کاربرد خارجی پلی‌آمین‌ها) بر عملکرد دانه و سایر ویژگی‌های زراعی کاملینا در شرایط شوری و غیرشور ضروری به‌نظر می‌رسد. هم‌چنین در زمینه کاربرد

خارجی پلی‌آمین‌ها به منظور افزایش تحمل گیاهان به تنش شوری پژوهش‌های کمی انجام شده است. بنابراین این آزمایش با هدف ارزیابی اثر سطوح مختلف تنش شوری و برگ‌پاشی اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین بر عملکرد دانه و غلظت عناصر غذایی برگ و ریشه در گیاه کاملینا انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش در اسفندماه سال ۱٤۰۰ در دانشگاه پیام نور ارومیه (فضای آزاد) به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی به صورت کشت گلدانی با ۱۲ تیمار و ۳ تکرار اجرا گردید. فاکتور تنش شوری با آب دریاچه ارومیه در سه سطح (صفر، ۱۵، ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) بود. تیمار محلول‌پاشی در ٤ سطح ۱- محلول‌پاشی با اسپرمین (۲ میلی‌مولار)، ۲- محلول‌پاشی با اسپرمیدین (۲ میلی‌مولار)، ۳- محلول‌پاشی با پوترسین (۲ میلی‌مولار) و شاهد (عدم محلول‌پاشی) بود که زمان اعمال محلول‌پاشی بعد از استقرار سه گیاهچه کاملینا در گلدان و رسیدن به مرحله چهار برگی هر ۳ روز یکبار (در مجموع در ٦ مرحله) انجام گرفت.

در ابتدا برای آماده‌سازی خاک گلدان‌ها به ترتیب با نسبت‌های ۳، ۱، ۱ خاک و کود دامی و ماسه بادی را مخلوط کرده و به گلدان‌هایی که برای زهکشی مناسب از قبل ته آن‌ها سوراخ شده بود اضافه شدند و در فضای آزاد قرار گرفتند. به‌دلیل یکسان بودن شرایط آزمایش برای پر کردن خاک در گلدان‌ها هر کدام را وزن کرده و به مقدار مساوی با خاک پر شدند. وزن هر گلدان برابر با ۱۳ کیلوگرم و دارای قطر ۳۰ و ارتفاع ۲٦ سانتی‌متری بودند. جهت تعیین رطوبت وزنی خاک در شرایط ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دایم از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-٦۰ سانتی متری خاک از تکرارهای هر آزمایش نمونه‌برداری شد و با استفاده از دستگاه صفحه فشار اندازه‌گیری شد. درصد رطوبت وزنی آن‌ها در شرایط ظرفیت زراعی با استفاده از رابطه ۱ تعیین گردید (۲۷):

$$Wm = \frac{W2-W1}{W1} \times 100 \qquad (۱)$$

در رابطه بالا، w_m درصد رطوبت وزنی خاک، w_2 وزن خاک مرطوب با واحد گرم و w_1 وزن خاک خشک به گرم می‌باشد.

در این آزمایش ظرفیت زراعی خاک ۲٤ درصد وزنی و نقطه پژمردگی دائم ۱۰ درصد وزنی تعیین شد. هم‌چنین بر اساس تجزیه خاک و توصیه کودی گوگردپاشی (ساری کود باسیلوس‌دار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) و سولفات روی (۲۰ کیلوگرم در هکتار) و سولفات آهن (۱۰ کیلوگرم در هکتار) به‌صورت پخش مستقیم در خاک و قبل از کاشت به گلدان‌ها اضافه شد. شروع کشت بذر کاملینا رقم سهیل در تاریخ ۲۳ اسفندماه سال ۱٤۰۰ به‌صورت دستی صورت گرفت و شش بذر در عمق ۱ سانتی‌متری در خاک هر گلدان قرار گرفت. برای تعیین زمان و حجم آبیاری از رابطه زیر (۲۷) استفاده شد:

$$V = \frac{(FC - \theta m) \times \rho_b \times D_{Root} \times A}{E_i} \qquad (۲)$$

جدول ۱- مؤلفه‌های مربوط به رابطه ۱.

Table 1. Components related to relation 1.

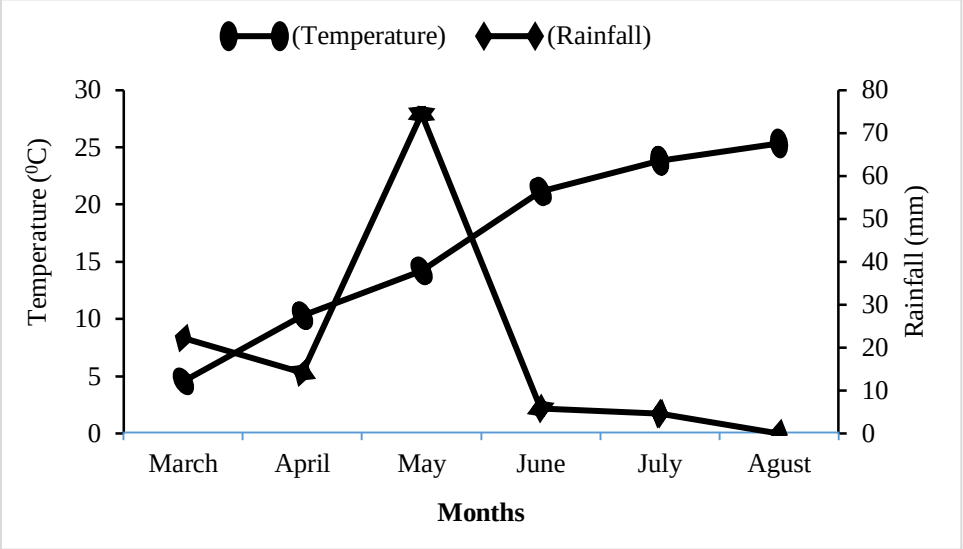
V	FC	θ_m	ρb	A	D_{Root}	Ei
حجم آب آبیاری بر حسب مترمکعب (۲٦۰ مترمکعب در هکتار)	درصد رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی (۲٤ درصد)	درصد رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری	وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب) (۱/٤۳)	مساحت آبیاری شده بر حسب مترمربع (۰/۰۷٦)	عمق توسعه ریشه بر حسب متر (۰/۲٦ متر)	راندمان آبیاری (۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد)

بنابراین در هر نوبت حدوداً ۲ لیتر آب به هر گلدان داده شد و دور آبیاری بر اساس میزان تبخیر و تعرق تنظیم شد که حدوداً ۵ روز بود. تیمار شوری به صورت پلکانی اعمال شد، بدین صورت که در روز نخست اعمال تنش شوری به غیر از تیمار شاهد که با آب مقطر آبیاری گردید بقیه تیمارها با آب دارای غلظت ۵ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شدند در آبیاری دوم تیمارهای شوری با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شدند در آبیاری سوم تیمارهای شوری با شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شدند در آبیاری چهارم تیمار ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر با همان شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و تیمار ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر با شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شدند. در آبیاری پنجم تیمار ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر با همان شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و تیمار ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر با شوری ۲۵ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شدند. در آبیاری ششم تیمار ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر با همان شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و تیمار ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر با شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شدند. پس از شش بار آبیاری بعد از شروع اعمال تیمارها روش پلکانی تمام و تیمارها ثابت شدند. بعد از چند بار اعمال تنش، از آب خروجی از ته گلدان‌ها برای اندازه‌گیری EC خاک استفاده شد و در نمونه‌هایی که شوری آب بیش از اندازه بود آبشویی انجام شد تا به میزان موردنظر برسند. عملیات برداشت برای تیمار آبیاری مطلوب، تنش شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب ۲۶، ۲۲ و ۱۷ خرداد ماه سال ۱۴۰۱ انجام گرفت. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۲ آمده است. هم‌چنین مشخصات دما و بارندگی (منحنی آمبرترمیک) منطقه مورد آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲- برخی از خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک اولیه محل آزمایش.

Table 2. Some physical and chemical characteristics of the primary soil of the test site.

pH	EC ($dS\ m^{-1}$)	درصد اشباع (٪) SP	درصد مواد خنثی‌شونده (٪) T.N.V	شن (٪) Sand	سیلت (٪) Silt	رس (٪) Clay	کربن آلی (٪) OC	بافت خاک Soil Texture	نیتروژن (٪) N	فسفر قابل‌جذب (ppm) Av.p	پتاسیم (ppm) K
7.28	3.62	29	16	62	15	23	0.98	لوم- رسی شنی S.C.L	0.1	28.3	807



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

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

در انتهای فصل رشد گیاه کاملینا برای محاسبه عملکرد دانه، بذرهای موجود در کپسول‌های سه بوته هر گلدان جدا و وزن گردید. برای محاسبه وزن خشک کل، تمامی اجزای کاملینا را خشک کرده سپس توسط ترازوی دقیق اندازه‌گیری شدند.

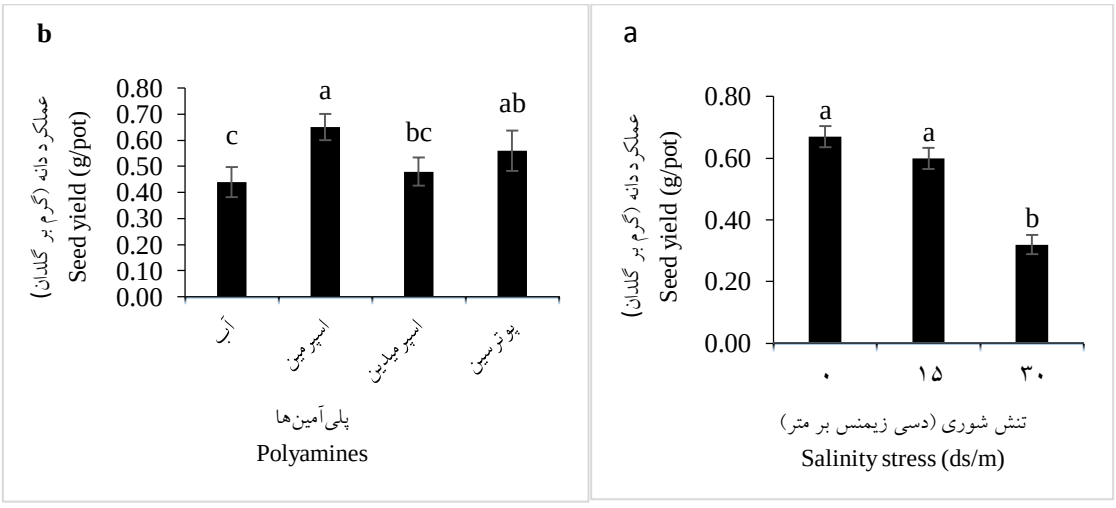
برای اندازه‌گیری عناصر برگ و ریشه، مقدار یک گرم از ریشه و برگ خشک شده در داخل بوته چینی ریخته شده و در کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت، تا به‌طور کامل خاکستر شود. سپس به نمونه خاکستر شده ۲۵ میلی‌لیتر محلول ۱:۱ اسید نیتریک افزوده شده و بعد از حرارت دادن تا دمای جوش نمونه صاف شده و بعد از حجم‌رسانی در بالن ۲۵ سی‌سی با آب مقطر جهت اندازه‌گیری استفاده شد. جهت اندازه‌گیری ابتدا دستگاه جذب اتمی (مدل PG-990 ساخت کمپانی PG instruments به همراه لامپ‌های مربوطه و مجهز به کپسول استیلن و کمپرسور هوا) را با محلول‌های استاندارد کالیبره کرده و با قرار دادن نمونه‌ها (محلول حاصل از خاکسترسازی) به‌طور مستقیم جذب نور حاصل از لامپ‌های کاتدی توخالی برای کلسیم، روی، آهن و منیزیم و نشر اتمی حاصل برای سدیم و پتاسیم اندازه‌گیری شد (۲۸). در صورت خارج بودن غلظت نمونه‌ها از محدوده خطی با رقیق‌سازی‌های مناسب و تهیه نمونه در محدوده خطی جذب و نشر را دوباره اندازه‌گیری کرده و نهایتاً فاکتور رقت در محاسبات وارد گردید (۲۸).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و MATATC انجام و مقایسه میانگین‌ها نیز توسط آزمون توکی در سطح پنج درصد انجام شد. هم‌چنین برای ترسیم نمودارها از برنامه Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس: نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده و برهمکنش تیمار تنش شوری و محلول‌پاشی پلی‌آمین‌ها تأثیر معنی‌داری بر میزان همه عناصر برگ و ریشه کاملینا داشت در مورد عنصر آهن برگ و عملکرد دانه فقط اثرات ساده تیمار تنش شوری و محلول‌پاشی پلی‌آمین‌ها معنی‌دار بود (جدول ۳).

عملکرد دانه: نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد، تأثیر اثرات ساده تیمار تنش شوری و محلول‌پاشی پلی‌آمین‌ها بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). با افزایش سطح تنش شوری عملکرد دانه کاهش معنی‌داری یافت به‌طوری‌که تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، به‌ترتیب عملکرد دانه را به میزان ۵۲ و ۱۰ درصد کاهش داد (شکل a۲). هم‌چنین محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین، در مقایسه با بدون محلول‌پاشی، به‌ترتیب عملکرد دانه را به میزان ۳۲، ۸ و ۲۱ درصد افزایش داد (شکل b۲). در آزمایشی گزارش شده است که تنش شوری ۳، ٦، ۹ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب سبب کاهش عملکرد دانه به مقدار ۱۲، ٤٨، ۷۱ و ۸۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد در گیاه کاملینا شده است (۲۹). شوری خاک تأثیرات مخربی بر توسعه گیاهان دارد و عملکرد محصول را کاهش می‌دهد (۳۰). نتایج سایر پژوهش‌ها نیز نشان داده است که تنش شوری به طور قابل‌توجهی ($P<0/05$) رشد گیاه را متوقف می‌کند و تیمارهای خارجی پلی‌آمین‌ها با مهار ناشی از تیمارهای شوری بر رشد و تولید کاملینا مقابله کرده است یافته‌های ما در این پژوهش با نتایج سایر پژوهش‌گران مطابقت دارد (۳۱). نتایج اعلایی و همکاران (۳۲) نیز نشان داد کاربرد پلی‌آمین اسپرمین رشد و عملکرد گیاه پروانش را در شرایط تنش بهبود بخشید.



شکل ۲- اثر کاربرد سطوح مختلف تنش شوری (a) و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها (b) بر عملکرد دانه گیاه کاملینا.

Figure 2. The effect of application different levels of salinity stress (a) and foliar spraying with polyamines (b) on seed yield of camellina.

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها بر عملکرد دانه و غلظت عناصر غذایی برگ و ریشه در کاملینا.

Table 3. ANOVA (mean squares) for the effects of deficit salinity stress levels and spraying with polyamines on seed yield and concentration of leaves and roots nutrients elements in Camelina.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares													
		عملکرد دانه Seed yield	سدیم برگ Leaf Na	سدیم ریشه Root Na	پتاسیم برگ Leaf K	پتاسیم ریشه Root K	کلسیم برگ Leaf Ca	کلسیم ریشه Root Ca	منیزیم برگ Leaf Mg	منیزیم ریشه Root Mg	روی برگ Leaf Zn	روی ریشه Root Zn	آهن برگ Leaf Fe	آهن ریشه Root Fe	سدیم/پتاسیم K/Na	پتاسیم + سدیم/کلسیم Ca/K+Na
تنش شوری Salinity stress	2	0.408**	55.75**	0.082**	126.24**	0.56**	0.92**	36457.34**	0.010**	695561.77**	7852.56**	40501.41**	1875.04**	191819.15**	1296.00**	0.013**
محلول‌پاشی Spraying	3	0.081**	0.791**	0.011**	7.05**	0.098**	5.64**	2674.99**	0.00045**	756436.88**	730.15 **	7491.41**	528.95**	227655.27**	116.53 **	0.025**
شوری × محلول‌پاشی Salinity × spraying	6	0.006^{ns}	0.36**	0.0022**	2.08**	0.014**	1.10**	1079.40**	0.00033**	38580.39**	77.96**	2384.92**	252.03^{ns}	40264.92**	111.65**	0.0052**
خطای آزمایشی Experimental error	24	0.0067	0.0082	0.00013	0.015	0.0019	0.012	78.73	0.000049	8351.56	14.85	442.71	113.03	398.82	0.331	0.00011
ضریب تغییرات C.V (%)	-	15.23	3.17	3.70	1.32	6.57	2.97	12.57	7.96	10.94	7.10	9.53	4.88	6.19	7.04	3.76

^{ns}، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

^{ns}, ** and * non-significant, significant at P≤0.01 and P≤0.05, respectively

یافته‌های ما به وضوح نشان داد که کاربرد خارجی پلی‌آمین‌ها می‌تواند با افزایش جذب عناصر میکرو و ماکرو باعث افزایش عملکرد دانه شده و به‌طور مؤثر به تحمل تنش کاملینا کمک کند. یافته‌های این مطالعه ما را به این نتیجه می‌رساند که کاربرد خارجی پلی‌آمین‌ها ممکن است به عنوان تنظیم‌کننده‌های بالقوه برای افزایش رشد و نمو کاملینا در شرایط شور و غیرشور از طریق افزایش جذب عناصر ریز و درشت مغذی، باعث تعدیل اثرات تنش شوری شده و عملکرد دانه را بهبود بخشد. وقتی گیاه در معرض تنش شوری قرار می‌گیرد بر اثر کاهش پتانسیل اسمزی دچار نوعی خشکی فیزیولوژیک شده و ریشه‌ها تحت این شرایط مقدار اسید آبسزیک را افزایش داده که این هورمون از طریق جریان تعرق به اندام‌های هوایی منتقل شده و در اندام‌های هوایی سبب کاهش هدایت روزنه‌ها و به تبعیت از آن کاهش تعرق می‌شود (۳۳). در نهایت، به دلیل کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن فتوسنتز و رشد و در نتیجه عملکرد دانه دچار اختلال می‌شود (۳٤). پژوهش‌گران دیگر نیز نشان دادند که با افزایش سطح تنش شوری، عملکرد دانه کاملینا کاهش معنی‌داری یافت (۲۹). از نظر فیزیولوژیکی، اثر مفید پرایمینگ با اسپرمین بر عملکرد دانه را می‌توان به ترتیب به افزایش تجمع پتاسیم و کلسیم در شاخساره‌های کاملینا نسبت داد (۲۹).

سدیم برگ و ریشه: بیش‌ترین (۵/۰٤ درصد) مقدار سدیم برگ از تیمار تنش شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر در شرایط بدون محلول‌پاشی و کم‌ترین (۰/۱۵ درصد) مقدار سدیم برگ از تیمار بدون تنش شوری و محلول‌پاشی با پوترسین به‌دست آمد (جدول ٤). با افزایش سطوح تنش شوری مقدار سدیم برگ افزایش معنی‌داری یافت به‌طوری‌که تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار سدیم برگ را به‌ترتیب ۸۹ و ۸۲ درصد افزایش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها اثرات تنش شوری را تعدیل داده و مقدار سدیم برگ را کاهش داد به طوری که در شرایط بدون تنش شوری، شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر، محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین به‌ترتیب (۱۲، ۷۳ و ۸٤ درصد)، (۲۳، ۳۱ و ٦ درصد) و (۹، ۵ و ۲ درصد) در کاهش مقدار سدیم ریشه مؤثر بوده است (جدول ٤). افزایش جذب عنصرهای معدنی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و کاهش جذب سدیم به‌وسیله تیمار پلی‌آمین‌ها و بالا بردن رشد و بهره‌وری ممکن است به‌دلیل اثرهای پلی‌آمین‌ها بر بسیاری از فرایندهای زیست‌شیمیایی و فیزیولوژیکی باشد (۲).

جدول ٤- مقایسه میانگین اثرات برهمکنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی بر غلظت عناصر غذایی برگ و ریشه در کاملینا.

Table 4. Means comparison of interaction effects of salinity stress and spraying on concentration of leaves and roots nutrients elements in Camelina.

تیمار Treatment		پتاسیم + سدیم/کلسیم Ca/K+Na	سدیم/پتاسیم K/Na	آهن ریشه Root Fe (mg/kg)	روی ریشه Root Zn (mg/kg)	روی برگ Leaf Zn (mg/kg)	منیزیم ریشه Root Mg (mg/kg)	منیزیم برگ Leaf Mg (%)	کلسیم ریشه Root Ca (mg/kg)	کلسیم برگ Leaf Ca (%)	پتاسیم ریشه Root K (%)	پتاسیم برگ Leaf K (%)	سدیم ریشه Root Na (%)	سدیم برگ Leaf Na (%)
تنش شوری Salinity stress	محلول‌پاشی Spraying													
0	آب Water	0.22 de	9.99 d	182.00 e	252.97 b	71.48 b	548.05 cde	0.105 b	28.82 e	3.07 e	0.82 b	11.63 cd	0.283 e	0.96 f
	اسپرمین Spermine	0.26 c	12.46 c	532.02 b	315.61 a	86.11 a	1113.68 b	0.112 b	25.66 e	3.83 d	1.12 a	12.26 b	0.224 g	0.84 f
	اسپرمیدین Spermidine	0.27 c	26.05 b	747.70 a	329.42 a	88.42 a	1424.11 a	0.134 a	43.00 de	3.86 cd	0.84 b	12.76 a	0.253 efg	0.26 g
	پوترسین Putrescine	0.24 cd	31.96 a	294.76 d	245.19 b	87.24 a	1246.71 ab	0.124 ab	32.87 e	3.18 e	0.89 b	11.94 bc	0.247 fg	0.15 g
15	آب Water	0.20 ef	2.17 g	149.00 ef	168.06 cd	32.78 de	411.97 de	0.076 cd	33.23 e	2.66 f	0.48 e	8.36 e	0.326 d	3.73 c
	اسپرمین Spermine	0.34 ab	3.93 ef	357.39 c	243.01 b	54.25 c	725.33 c	0.106 b	37.93 e	5.25 a	0.65 c	11.66 cd	0.279 ef	2.85 d
	اسپرمیدین Spermidine	0.27 c	4.24 e	584.96 b	178.73 cd	53.18 c	1097.12 b	0.084 c	49.90 de	4.06 cd	0.62 cd	11.41 d	0.273 ef	2.56 e
	پوترسین Putrescine	0.32 b	2.45 fg	266.62 d	218.37 bc	37.61 d	1040.71 b	0.077 cd	60.31 d	4.17 c	0.57 cde	8.68 e	0.269 ef	3.50 c
30	آب Water	0.18 f	1.01 g	111.00 f	130.62 d	24.33 e	333.66 e	0.054 e	97.69 e	2.05 g	0.33 f	5.25 h	0.482 a	5.04 a
	اسپرمین Spermine	0.35 ab	1.24 g	143.33 ef	203.35 bc	35.44 de	628.82 cd	0.064 cde	122.94 bc	3.88 cd	0.62 cd	5.48 gh	0.333d	4.57 b
	اسپرمیدین Spermidine	0.37 a	1.41 g	249.61 d	170.23 cd	49.53 c	717.50 c	0.058 de	128.18 b	4.74 b	0.61 cd	6.75 f	0.436 b	4.78 ab
	پوترسین Putrescine	0.35 ab	1.15 g	248.17 d	192.51 bcd	30.95 de	729.72 c	0.060 de	186.36 a	4.06 cd	0.50 de	5.62 g	0.389 c	4.93 a

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

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

بیش‌ترین (۰/۴۸۲ درصد) مقدار سدیم ریشه از تیمار تنش شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر در شرایط بدون محلول‌پاشی و کم‌ترین (۰/۲۲۴ درصد) مقدار سدیم ریشه از تیمار بدون تنش شوری و محلول‌پاشی با اسپرمین بدست آمد (جدول ٤). با افزایش سطوح تنش شوری مقدار سدیم ریشه افزایش معنی‌داری یافت به‌طوری‌که تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار سدیم ریشه را به‌ترتیب ۳۹ و ۱۱ درصد افزایش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها مقدار سدیم ریشه را کاهش داد به‌طوری‌که در شرایط بدون تنش شوری، شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین به‌ترتیب (۲۱، ۱۱ و ۱۳ درصد)، (١٤، ١٦ و ۱۷ درصد) و (۳۱، ۹ و ۱۹ درصد) در کاهش مقدار سدیم ریشه مؤثر بوده است (جدول ٤). بنابراین در کاهش اثرات تنش شوری در شرایط بدون تنش شوری، شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب محلول‌پاشی برگی پلی‌آمین‌های اسپرمین، پوترسین و اسپرمین جهت کاهش غلظت سدیم ریشه سودمند بوده است. نتایج پژوهش‌گران نشان می‌دهد در شرایط شوری نمک سدیم به طور آزادانه وارد گیاه شده و موجب افزایش یون سدیم می‌شود (۳۵). هم‌چنین تنش شوری موجب اختلال در جذب مواد غذایی و جذب بیش‌تر یون سدیم در محیط تنش می‌شود (٣٦). در آزمایشی گزارش شد با افزایش سطح شوری، یون سدیم در اندام‌های هوایی و ریشه ذرت افزایش یافت (۳۷). همسو با نتایج ما در این پژوهش در آزمایشی گزارش شد که سطوح شوری سبب افزایش غلظت کادمیم و سدیم و کاهش غلظت آهن، روی، منگنز و مس در گیاه آزولا شد (۳۸).

پتاسیم برگ و ریشه: غلظت پتاسیم برگ و ریشه در تنش شوری روند کاهشی نشان داد و با افزایش غلظت سدیم کلرید تا تنش شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر، یون پتاسیم در برگ و ریشه به کم‌ترین غلظت رسید (جدول ٤). تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار پتاسیم برگ را به‌ترتیب ۵۲ و ۱۷ درصد کاهش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها اثرات تنش شوری را تعدیل داده و مقدار پتاسیم برگ را افزایش داد به‌طوری‌که در شرایط بدون تنش شوری، شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین به‌ترتیب (۵، ۹ و ۲ درصد)، (۲۸، ۲۷ و ٤ درصد) و (٤، ۲۲ و ٦ درصد) در افزایش مقدار پتاسیم ریشه مؤثر بوده است (جدول ٤).

بیش‌ترین (۱/۱۲ درصد) مقدار پتاسیم ریشه از تیمار بدون تنش شوری در شرایط محلول‌پاشی با اسپرمین و کم‌ترین (۰/۳۳ درصد) مقدار پتاسیم ریشه از تیمار تنش شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و بدون محلول‌پاشی به‌دست آمد (جدول ٤). با افزایش سطوح تنش شوری مقدار پتاسیم ریشه کاهش معنی‌داری یافت به‌طوری‌که تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار پتاسیم ریشه را به‌ترتیب ٤٤ و ۳۷ درصد کاهش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها مقدار پتاسیم ریشه را افزایش داد به‌طوری‌که در شرایط بدون تنش شوری، شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین به‌ترتیب (۲۷، ۲ و ۸ درصد)، (٢٦، ۲۲ و ١٦ درصد) و (٤٧، ٤٦ و ٣٤ درصد) در افزایش مقدار پتاسیم ریشه مؤثر بوده است (جدول ٤). بنابراین در هرسه شرایط مختلف تنش شوری، محلول‌پاشی با اسپرمین نسبت به سایر پلی‌آمین‌ها برتر بوده است.

پتاسیم یک عنصر سیتوپلاسمی ضروری است و به‌علت نقش آن در تنظیم اسمزی و نیز اثر رقابتی آن با سدیم، بیش‌تر به عنوان یک عنصر مهم در شرایط شوری در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل پیشنهاد شده است که غلظت اندک سدیم یا به عبارت دیگر نسبت کم سدیم به پتاسیم در برگ‌ها رابطه نزدیک با مقاومت به شوری دارد (۳۹). قابلیت دسترسی پتاسیم برای گیاه در خاک با کاهش محتوای آب خاک، کاهش می‌یابد که منجر به کاهش تحرک پتاسیم تحت شرایط تنش شوری می‌شود (۱٦). گزارش شده است که غالبیت یون سدیم در سطوح بالای شوری از جذب پتاسیم توسط گیاه جلوگیری نموده و سبب کاهش تجمع یون پتاسیم در گیاه می‌شود (٤۰). در آزمایشی گزارش شده است شوری باعث افزایش یون سدیم و کاهش یون پتاسیم برگ زیره سبز شد (۳۹). در پژوهشی بیان شد که کاربرد خارجی پلی‌آمین‌ها به‌ویژه پوترسین از طریق تنظیم کانال‌های سدیم و پتاسیم سبب افزایش جذب پتاسیم و کاهش جذب سدیم می‌شوند (۳).

کلسیم برگ و ریشه: بیش‌ترین (۵/۲۵ درصد) مقدار کلسیم برگ از تیمار تنش شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در شرایط محلول‌پاشی با اسپرمین و کم‌ترین (۲/۰۵ درصد) مقدار کلسیم برگ از تیمار تنش شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و بدون محلول‌پاشی به‌دست آمد (جدول ٤). با افزایش سطوح تنش شوری مقدار کلسیم برگ افزایش معنی‌داری یافت به طوری که تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار کلسیم برگ را به‌ترتیب ٦ و ۱٤ درصد افزایش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها مقدار کلسیم برگ را افزایش داد به طوری که در شرایط بدون تنش شوری، شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب محلول‌پاشی با اسپرمیدین، اسپرمین و اسپرمیدین در افزایش مقدار کلسیم برگ مؤثرتر از سایر پلی‌آمین‌ها بوده است (جدول ٤). با افزایش سطوح تنش شوری، مقدار کلسیم ریشه افزایش معنی‌داری یافت به‌طوری‌که تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار کلسیم ریشه را به‌ترتیب ۷٦ و ۲۸ درصد افزایش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها مقدار کلسیم برگ را افزایش داد به‌طوری‌که در شرایط بدون تنش شوری و سطوح مختلف تنش شوری به‌ترتیب محلول‌پاشی با اسپرمیدین و پوترسین در افزایش مقدار کلسیم ریشه برتر از سایر پلی‌آمین‌ها بوده است (جدول ٤).

در آزمایشی گزارش شد که تنش شوری غلظت روی را در اندام هوایی و ریشه کاهش داد، اما عناصر ماکرو مانند کلسیم و فسفر را در گیاه کاملینا افزایش داد (٤۱). گزارش‌های قبلی نشان داده‌اند که افزایش مقدار کلسیم در ریشه‌ها ممکن است در طول تنش شوری به‌دلیل حفظ یکپارچگی غشای سلولی که باعث کاهش سدیم به نفع جذب پتاسیم می‌شود، مفید باشد (٤۲). کاهش کلسیم گیاه در شرایط شور را می‌توان به کاهش تعرق گیاه نسبت داد. عملکرد محصولات در شرایط شور به سه دلیل کاهش خواهد یافت ۱- شوری بر فراهمی عناصر غذایی اثر می‌گذارد، ۲- شوری سبب ایجاد جذب رقابتی می‌شود و ۳- شوری بر انتقال یا بخش‌بندی عنصر غذایی در گیاه تأثیرگذار است (۳۸). در آزمایش دیگری گزارش شده است با افزایش تنش شوری، غلظت کلسیم اندام‌های هوایی توت‌فرنگی کاهش معنی‌داری پیدا کرد (٤۳). این ممکن است تا حدی با این واقعیت توضیح داده شود که این نوع آزمایش‌ها تحت ترکیب‌های یونی مختلف و محیط‌های رشد ریشه متفاوت انجام می‌شوند، که هم‌چنین منجر به شرایط مختلف هوادهی ریشه و شرایط محیطی ریشه و بخش

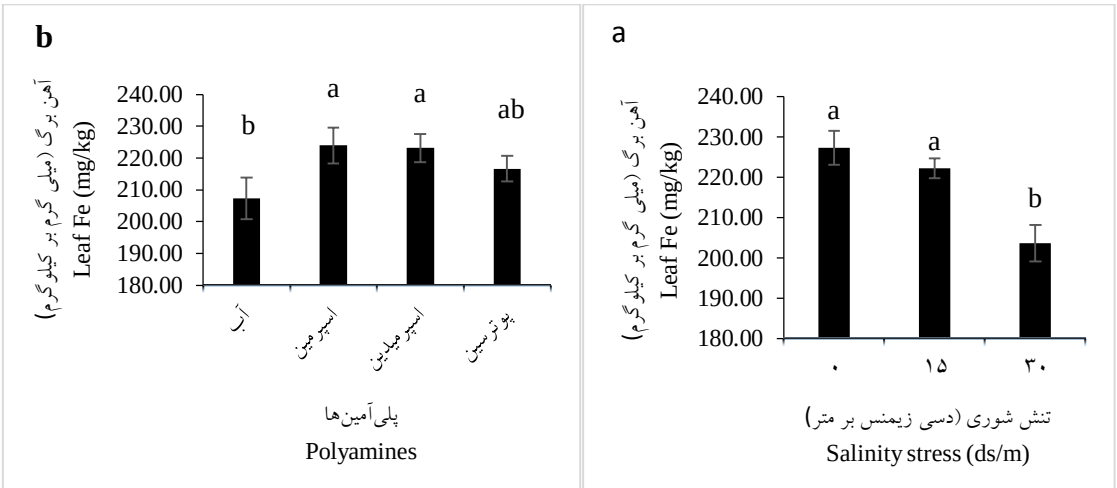
هوایی متفاوت می‌شود. در پژوهشی بیان شده است که پلی‌آمین‌ها مانند پوترسین می‌توانند نفوذپذیری غشاء را نسبت به کلسیم افزایش دهند و به این طریق سبب افزایش کلسیم در گیاه شوند (٤).

منیزیم برگ و ریشه: با افزایش سطوح تنش شوری مقدار منیزیم برگ و ریشه کاهش معنی‌داری یافت به‌طوری که تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار منیزیم برگ و ریشه را به‌ترتیب (۵۰ و ۲۸ درصد) و (٥٦ و ٢٤ درصد) کاهش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها مقدار منیزیم برگ و ریشه را افزایش داد به‌طوری‌که در شرایط بدون تنش شوری و سطوح مختلف تنش شوری به‌ترتیب محلول‌پاشی با اسپرمیدین و اسپرمین در افزایش مقدار منیزیم برگ مفید بوده است (جدول ٤). محلول‌پاشی با اسپرمیدین (در شرایط بدون شوری و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر) و محلول‌پاشی با اسپرمیدین (شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) تأثیر بیش‌تری در افزایش منیزیم ریشه گیاه کاملینا داشته است (جدول ٤). به دلیل افزایش غلظت سدیم در شرایط شور و رقابت سدیم با منیزیم برای جذب، غلظت منیزیم در بافت‌های گیاه کاهش می‌یابد (۳۸). در اغلب گیاهان چه هالوفیت‌ها و چه گلایکوفیت‌ها، کمبود منیزیم باعث کاهش رشد ریشه می‌شود (٤٤). منیزیم فاکتور کلیدی تنظیم مراحل مختلف تقسیم سلولی است و در سنتز پروتئین‌های لازم برای عملکرد آنزیم پلیمراز، DNA تقسیم سلولی، همانندسازی لیگاز و بازآرایی اسکلت سلولی دخیل است (٤٥). از این رو، در نبود منیزیم، تقسیم سلولی مهار شده و در نتیجه طول و زیست‌توده ریشه کاهش می‌یابد. منیزیم با سدیم رابطه رقابتی داشته و می‌تواند اثرات سمی سدیم را کاهش دهد (٤٦). در شوری‌های زیاد به ویژه غلظت زیاد یون سدیم و از بین رفتن تعادل غلظت عناصر در خاک، به دلیل تشابه حامل‌های جذب منیزیم و سدیم در ریشه، جایگاه‌های اتصال، بیش‌تر با سدیم اشغال شدند و به این ترتیب منیزیم کم‌تری به سلول‌های ریشه انتقال می‌یابد (٤٧). در پژوهشی گزارش شده است که با افزایش سطح شوری غلظت عناصر کلسیم، منیزیم، روی و آهن برگ کاهش معنی‌داری پیدا کرد (٤٨). در آزمایش دیگری بیان شد که با افزایش سطح شوری غلظت عناصر منیزیم و پتاسیم برگ و ریشه گیاه گواوا کاهش معنی‌داری پیدا کرد (٤٩). در پژوهشی گزارش شده است که پلی‌آمین‌ها از طریق افزایش رشد ریشه و بهبود تنظیم تعامل موجودات زنده خاک با ریشه سبب افزایش عناصر معدنی مانند منیزیم و روی می‌شوند (٥).

روی برگ و ریشه: با افزایش سطوح تنش شوری مقدار روی برگ و ریشه کاهش معنی‌داری یافت به‌طوری‌که تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار روی برگ و ریشه را به‌ترتیب (۵۸ و ٤٧ درصد) و (۳۹ و ۲۹ درصد) کاهش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها مقدار روی برگ و ریشه را افزایش داد به طوری که در شرایط بدون تنش شوری، تنش شوری ۱۵ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب محلول‌پاشی با اسپرمیدین، اسپرمین و اسپرمیدین در افزایش مقدار روی برگ سودمند بوده است (جدول ٤). بررسی مقایسه میانگین برهمکنش تیمارها در عنصر روی ریشه نشان داد در شرایط بدون شوری و شوری به‌ترتیب محلول‌پاشی با اسپرمیدین و اسپرمین در افزایش مقدار روی ریشه غالبیت داشته است (جدول ٤). پلی‌آمین‌ها فعالیت فرآیندهای متابولیکی را در گیاهان افزایش می‌دهند و به این ترتیب عملکرد فیزیولوژیکی گیاهان به دلیل بهبود کارایی ریشه در جذب عناصر پرمصرف و کم‌مصرف از خاک بهبود می‌یابد (٦). تفاوت در اندام هوایی و ریشه برای

عنصر روی می‌تواند به دلیل انتقال مؤثر آن از طریق پوست شاخه‌ها و جابجایی آن از طریق آوند چوبی باشد که در کاملینا رخ می‌دهد (۷). روی یک ریزمغذی است که نقش عمده‌ای در فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی زیربنایی رشد گیاه و متابولیسم کربوهیدرات دارد که تأثیر مفیدی بر سایر ریزمغذی‌های ضروری گیاه دارد (۵۰). قابل ذکر است، عنصر روی یک مداخله ضروری با آنزیم‌های مختلف است یا می‌تواند به عنوان یک کوفاکتور ساختاری یا تنظیمی عملکردی در نظر گرفته شود (۵۱). عنصر روی هم‌چنین جذب بیش از حد سدیم و کلر را محدود می‌کند (۵۲). گزارش شده است که با افزایش تنش شوری، محتوای روی در ریشه و اندام‌های هوایی در گیاه کاملینا کاهش معنی‌داری یافت (۳۵). غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف، بسته به گونه، سطح شوری، مقدار عناصر غذایی پرمصرف و نوع اندام گیاهی تفاوت می‌کند (۸). ثابت شده است که روی می‌تواند بر غلظت کلسیم، نیتروژن و فسفر بافت اثر بگذارد (۵۳). افزایش جذب سدیم موجب کاهش جذب عناصر ضروری و القای سم به گیاه می‌گردد (۹). بنابراین به نظر می‌رسد که کاهش جذب عناصر ضروری مانند روی، آهن و پتاسیم به همین دلیل باشد.

جذب آهن برگ و ریشه: مقایسه میانگین اثرات ساده تنش شوری و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها نشان داد که بیش‌ترین مقدار آهن برگ از شرایط بدون تنش شوری و کم‌ترین مقدار آن از تیمار شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر حاصل شد. تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار آهن برگ را به‌ترتیب ۱۰ و ۲ درصد کاهش داد (شکل a۳). یون‌های کلسیم و سدیم دارای اثرات رقابتی با یکدیگر بوده و تنظیم مناسب این دو عنصر بر غلظت عناصر غذایی مانند آهن، روی، کلسیم و پتاسیم تأثیر به‌سزایی دارد (۱۰). به دلیل فراوانی و غالبیت یون سدیم در خاک و آب‌های شور، از جذب بسیاری از عناصر پرمصرف و کم‌مصرف کاسته می‌شود (۱۱). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها مقدار آهن برگ را افزایش داد و بین تیمارهای مختلف محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها از نظر آهن برگ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل b۳).



شکل ۳- اثر کاربرد سطوح مختلف تنش شوری (a) و محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها (b) بر آهن برگ کاملینا.

Figure 3. The effect of application different levels of salinity stress (a) and foliar spraying with polyamines (b) on leaf iron of camellina.

با افزایش سطوح تنش شوری مقدار آهن ریشه کاهش معنی‌داری یافت به طوری که تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری، مقدار آهن ریشه را به‌ترتیب ۵۷ و ۲۳ درصد کاهش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها مقدار آهن ریشه را افزایش داد به طوری که در تمامی شرایط بدون تنش شوری و تنش شوری، محلول‌پاشی با اسپرمیدین در افزایش مقدار آهن ریشه تأثیر بیش‌تری داشته است (جدول ٤). عنصر آهن تأثیر بسیار مهمی در توسعه کلروپلاست، دریافت انرژی نورانی و انتقال الکترون از آب به $NADP^+$ دارد (٥٤). در پژوهشی گزارش شده است که تیمار تنش شوری، جذب و غلظت آهن در ریشه و شاخساره نخود را کاهش داد (۵۵). گزارش شده است که اسپرمین تعادل مواد معدنی را در هر دو رقم گندم، به‌ویژه در رقم متحمل، تغییر داد. به عنوان مثال، تجمع سدیم، کلسیم و کلر، در اندام هوایی و تجمع سدیم و کلر در ریشه رقم متحمل افزایش یافت. این ممکن است به دلیل افزایش توانایی رقم متحمل برای انتقال یون‌های معدنی به برگ‌ها برای حفظ تعادل یونی باشد (٥٦). در مطالعه‌ای، پرایمینگ با اسپرمین قبل از تنش شوری باعث کاهش سدیم اندام هوایی و ریشه شد، اما در رقم غیرتحمل مقدار پتاسیم و کلر اندام هوایی را افزایش داد. بنابراین، پیش‌تیمار با اسپرمین با کاهش مقدار سدیم و افزایش جذب پتاسیم در شرایط تنش، هموستاز یونی را در رقم غیرتحمل‌کننده ارتقا داد (٥٦).

نسبت جذب پتاسیم به سدیم: در پژوهش حاضر، شوری باعث افزایش سدیم، کاهش پتاسیم شد که در نتیجه باعث کاهش نسبت K^+/Na^+ می‌شود. افزایش جذب سدیم معمولاً با کاهش جذب پتاسیم و در نتیجه کاهش نسبت پتاسیم به سدیم همراه است (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها نسبت جذب پتاسیم به سدیم را افزایش داد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها نسبت جذب پتاسیم به سدیم را افزایش داد (جدول ٤). در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است که محلول‌پاشی پلی‌آمین‌ها به گیاهچه‌های تیمار شده با نمک باعث کاهش تجمع سدیم و کلر اندام‌های هوایی شد بنابراین، باعث کاهش اثرات سمی ناشی از سطوح بالای این یون‌ها گردید. از سوی دیگر، گیاهان تیمار شده با پلی‌آمین‌ها محتوای سدیم کم‌تر و نسبت جذب پتاسیم به سدیم بیش‌تری را نشان دادند، که نشان‌دهنده تمایز بهبود یافته بین کاتیون‌های تک ظرفیتی و هم‌چنین مهار از دست دادن پتاسیم تحت شرایط تنش شوری است (۵۷). کاهش پتاسیم و افزایش سدیم یکی از بارزترین آثار تنش شوری است که در بسیاری از گزارش‌ها به آن اشاره شده است. کاهش غلظت پتاسیم در گیاه در محیط شور به این علت است که وجود غلظت‌های بالای سدیم در محیط خارجی باعث ایجاد رقابت با پتاسیم برای ورود به داخل سلول می‌شود و چون این دو یون دارای شعاع هیدراته مشابهی هستند، پروتئین‌های انتقال‌دهنده آن‌ها ممکن است در تشخیص آن‌ها دچار اشتباه شوند. بنابراین، سدیم به راحتی از طریق ناقل‌های با تمایل کم به پتاسیم و یا با تمایل زیاد به پتاسیم وارد سلول شده و جذب پتاسیم کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، انتقال سدیم به قسمت‌های مختلف گیاه و برگ‌ها باعث جایگزینی آن با کلسیم در فضای آپوپلاستی شده که به دپلاریزاسیون غشا منجر می‌شود و در نتیجه، توانایی غشاها برای جذب انتخابی برخی از یون‌ها دچار اختلال شده و عدم تعادل یونی غیرقابل اجتناب خواهد بود (۵۸). از آن‌جا که پتاسیم عنصری ضروری برای گیاهان و دارای نقش کلیدی در فرآیندهای فیزیولوژیک و رشد گیاه، سنتز پروتئین و نشاسته، انتقال قندها و فعال شدن بسیاری از آنزیم‌ها

از جمله آنزیم‌های کلیدی در فتوسنتز و تنفس و حفظ یکپارچگی سیستم فتوسنتزی، سنتز ATP، تنظیم اسمزی، باز و بسته شدن روزنه، خنثی کردن بارهای منفی پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک اسید، جایگزین شدن آن توسط سدیم می‌تواند باعث آسیب به گیاه شود، زیرا سدیم قادر به انجام نقش‌های پتاسیم نیست .تجمع سدیم و تغییر نسبت پتاسیم به سدیم در سیتوپلاسم می‌تواند روی فرآیندهای انرژی‌زا اثر بگذارد. جایگزینی سدیم به جای پتاسیم می‌تواند سبب غیرفعال شدن آنزیم‌ها، کاهش رشد و حتی مرگ سلول یا گیاه شود (۵۹).

در این پژوهش، علاوه بر یون‌های سدیم و پتاسیم، تنش شوری در جذب و انتقال عناصر دیگر نیز تغییر به وجود آورد و باعث کاهش مقدار روی، آهن و منیزیم شد. گزارش شده است که یکی از فاکتورهای نشان‌دهنده تحمل گیاهان به تنش شوری، نسبت جذب پتاسیم به سدیم اندام هوایی است و هرچه این نسبت بیش‌تر باشد تحمل گیاه به شوری بیش‌تر است (٦٠). در محیط شور سطح یون سدیم بالا بوده و فعالیت کلسیم محلول را کاهش داده و ممکن است جایگزین یون کلسیم موجود در غشاء پلاسمایی سلول‌ها گردد در نتیجه نسبت پتاسیم به سدیم به نفع سدیم تغییر می‌کند. پایین بودن غلظت کلسیم در شرایط شور، ممکن است به شدت عمل غشاء را متأثر کند که به عنوان مانعی برای ورود یون‌ها به داخل سلول عمل می‌کند (٦١). جذب کم‌تر عناصر معدنی مانند سدیم و کلر و جذب بیش‌تر عناصری مانند پتاسیم مکانیسم مهمی برای تحمل نمک در اکثر گونه‌های گیاهی است (٦٢). در آزمایشی تیمار بذر قبل از کاشت با پوترسین با کاهش جذب و تجمع سدیم و کلر باعث جلوگیری از تنش شوری در رقم متحمل گندم شد. تیمار بذر قبل از کاشت با اسپرمیدین، بدون توجه به رقم، زمانی که تنش شوری داشت، رشد یا جذب را بهبود بخشید و باعث کاهش سدیم و کلر اندام هوایی و ریشه در هر دو رقم تحت تنش شوری شد (٥٦). مطالعات قبلی نشان داد پلی‌آمین‌ها با حفظ تعادل کاتیون-آنیون یکپارچگی غشا را حفظ می‌کنند هم‌چنین کاربردهای پوترسین به‌دلیل نقش پوترسین در کنترل تعادل کاتیون و آنیون، جذب سدیم از خاک را در برخی محصولات مانند برنج و ماش کاهش یا مهار می‌کند (٦٣). گزارش شده است که افزایش تحمل نمک به واسطه اسپرمیدین خارجی در سطح مولکولی با تعامل مکانیسم‌های محافظتی مختلفی که در حفظ تعادل اکسیداسیون و احیای یونی، تعادل اسمزی و پیام‌دهی پلی‌آمین تحت تنش شوری نقش دارند، تنظیم می‌شود (٦٤).

نسبت کلسیم به مجموع سدیم و پتاسیم برگ و ریشه: با افزایش غلظت کلرید سدیم (تنش شوری)، نسبت کلسیم به مجموع سدیم و پتاسیم برگ و ریشه افزایش یافت و بیش‌ترین نسبت آن در شرایط تنش شوری شدید (۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) مشاهده شد (جدول ٤). در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها نسبت کلسیم به مجموع سدیم و پتاسیم برگ و ریشه را افزایش داد (جدول ٤). یافته‌های ما در این پژوهش با نتایج (٤٩) مطابقت داشت. در شرایط تنش‌های محیطی بخصوص تنش شوری، علاوه بر تداخل جذب کلسیم با عناصری مانند سدیم، کارکرد این عنصر در فعالیت‌های حیاتی گیاه نیز تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد. کلسیم از طریق تشکیل پیوندهای بین مولکولی باعث حفظ تمامیت غشاء، پایداری دیواره سلول و ممانعت از ورود سدیم به درون سلول می‌گردد. از این‌رو، در شرایط تنش بسته به میزان کلسیم ریشه، نفوذپذیری غشاء، تنظیم فشار اسمزی، محتوای سدیم و در نتیجه نسبت پتاسیم به سدیم تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد (٦٥).

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش تنش شوری مقدار عناصر برگ و ریشه گیاه کاملینا به‌جز عنصر سدیم و کلسیم کاهش معنی‌داری یافت. تنش شوری ۳۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار بدون شوری به‌ترتیب پتاسیم برگ (۵۲ و ۱۷ درصد)، پتاسیم ریشه (٤٤ و ۳۷ درصد)، منیزیم برگ (۵۰ و ۲۸ درصد)، منیزیم ریشه (٥٦ و ٢٤ درصد)، روی برگ (۵۸ و ٤٧ درصد)، روی ریشه (۳۹ و ۲۹ درصد)، آهن برگ (۱۰ و ۲ درصد)، آهن ریشه (۵۷ و ۲۳ درصد) و عملکرد دانه را (۵۲ و ۱۰ درصد) کاهش داد ولی مقدار سدیم برگ (۸۹ و ۸۲ درصد)، سدیم ریشه (۳۹ و ۱۱ درصد)، کلسیم برگ (١٤ و ٦ درصد) و کلسیم ریشه را (٧٦ و ۲۸ درصد) افزایش داد. هم‌چنین تنش شوری به‌دلیل افزایش مقدار سدیم و کاهش پتاسیم، باعث کاهش نسبت جذب پتاسیم به سدیم شد ولی نسبت کلسیم به مجموع سدیم و پتاسیم ریشه و برگ را افزایش داد. در تمام سطوح شوری محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها با کاهش مقدار سدیم برگ و ریشه باعث افزایش مقدار پتاسیم برگ و ریشه، منیزیم برگ و ریشه، روی برگ و ریشه، آهن برگ و ریشه شد. محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها باعث افزایش نسبت پتاسیم به سدیم و نسبت کلسیم به مجموع سدیم و پتاسیم ریشه و برگ شد. هم‌چنین محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین، در مقایسه با بدون محلول‌پاشی، به‌ترتیب عملکرد دانه را به میزان ۳۲، ۸ و ۲۱ درصد افزایش داد. به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین با بهبود جذب عناصر ماکرو و میکرو ریشه و برگ، توانست اثرات تنش شوری را تعدیل داده و باعث بهبود عملکرد دانه کاملینا در شرایط تنش شوری شد و از کاهش بیش از حد عملکرد دانه جلوگیری کرد بنابراین محلول‌پاشی با پلی‌آمین‌ها به عنوان راهکاری سودمند جهت کاهش اثرات منفی تنش شوری در گیاه کاملینا پیشنهاد می‌گردد. هم‌چنین جهت تکمیل پژوهش‌ها در ارتباط با تنش شوری پیشنهاد می‌گردد سطوح پایین‌تر تنش شوری روی گیاه کاملینا اعمال شود تا میزان تحمل آن به شوری دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد. بررسی اعمال زمان‌های مختلف محلول‌پاشی پلی‌آمین‌ها و سایر تعدیل‌کننده‌های تنش شوری روی گیاه کاملینا مفید خواهد بود.

منابع

1. FAO. (2008). FAO Land and Plant Nutrition Management Service.
2. Fariduddin, Q., Mir, B. A., Yusuf, M., & Ahmad, A. (2013). Comparative roles of brassinosteroids and polyamines in salt stress tolerance. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(7), 2037-2053.
3. Diao, Q., Song, Y., & Qi, H. (2015). Exogenous spermidine enhances chilling tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings via involvement in polyamines metabolism and physiological parameter levels. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37(11), 230.
4. Sharma, A., Slathia, S., Pal, S., Sharma, Y., & Langer, A. (2014). Role of 24-Epibrassinolide, Putrescine and Spermine in Salinity Stressed Adiantum capillus-veneris Leaves. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: *Biological Sciences*, 84, 183-192.
5. Acosta-Motos, J. R., Ortuño, M. F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M. J., & Hernandez, J. A. (2017). Plant Responses to Salt Stress: Adaptive Mechanisms. *Agronomy*, 7(1), 1-38.
6. Sun, J., Chen, S. L., Dai, S. X., Wang, R. G., Li, N. Y., Shen, X., Zhou, X. Y., Lu, C. F., Zheng, X. J., Hu, Z. M., Zhang, Z. K., Song, J., & Xu, Y. (2009).

Ion flux profiles and plant ion homeostasis control under salt stress. *Plant Signaling & Behavior*, 4, 261-4.

7. Yu, Z., Duan, X., Luo, L., Dai, S., Ding, Z., & Xia, G. (2020). How Plant Hormones Mediate Salt Stress Responses. *Trends in Plant Science*, 25(11), 1117-1130.
8. Balal, R. M., Shahid, M. A., Khan, N., Sarkhosh, A., Zubair, M., Rasool, A., Mattson, N., Gomez C., Bukhari, M. A., Waleed, M., & Nasim, W. (2022). Morphological, Physiological, and Biochemical Modulations in Crops under Salt Stress, in Building Climate Resilience in Agriculture, W.N.J. et al., Editor, Springer International Publishing.
9. Min, W., Guo, H., Zhou, G., Zhang, W., Ma, L., Ye, J., & Hou, Z. (2014). Root distribution and growth of cotton as affected by drip irrigation with saline water. *Field Crops Research*, 169, 1-10.
10. Wakeel, A. (2013). Potassium–sodium interactions in soil and plant under saline-sodic conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(3), 344-354.
11. Hassanpouraghdam, M. B., Mehrabani, L. V., & Tzortzakis, N. (2020). Foliar application of nano-zinc and iron affects physiological attributes of rosmarinus officinalis and quietens nacl salinity depression. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 335-345.
12. Novo, L. A., Covelo, E. F., & González, L. (2014). Effect of salinity on zinc uptake by *Brassica juncea*. *International Journal of Phytoremediation*, 16(12-7), 704-718.
13. Tolay, I. (2021). The impact of different Zinc (Zn) levels on growth and nutrient uptake of Basil (*Ocimum basilicum* L.) grown under salinity stress. *PLOS ONE*, 16, e0246493.
14. Alghamdi, E., Farooq, M., & Metwali, E. (2022). Influence of nano zinc oxide on the in vitro callus growth, ex vitro tuber yield and nutritional quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars under salt stress. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 32, 440-449.
15. Mirvat, E. G., Mohamed, M. H., & Tawfik, M. M. (2006). Effect of phosphorus fertilizer and foliar spraying with zinc on growth, yield and quality of groundnut under reclaimed sandy soils. *Journal of Applied Science Research*, 2(8), 491-496.
16. Boostani, H. R., & Farrokhnejad, E. (2018). Effect of plant growth promoting rhizobacteria, mycorrhizae fungi and salinity stress on the uptake of some nutrients by corn (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Process and Function*, 7(24), 39-52.
17. Roychoudhury, A., Basu, S., & Sengupta, D. N. (2011). Amelioration of salinity stress by exogenously applied spermidine or spermine in three varieties of indica rice differing in their level of salt tolerance. *Journal of Plant Physiology*, 168(4), 317-28.
18. Radhakrishnan, R., & Lee, I. J. (2013). Regulation of salicylic acid, jasmonic acid and fatty acids in cucumber (*Cucumis sativus* L.) by spermidine promotes plant growth against salt stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(12), 3315-3322.
19. Chattopadhayay, M. K., Tiwari, B. S., Chattopadhyay, G., Bose, A., Sengupta, D. N., & Ghosh, B. (2002). Protective role of exogenous polyamines on salinity-stressed rice (*Oryza sativa*) plants. *Physiology and Plant*, 116(2), 192-199.
20. Hussein, M., Nadia, E., Gereadly, H., & El-Desuki, M. (2006). Role of putrescine in resistance to salinity of pea plants (*Pisum sativum* L.). *Journal of Applied Sciences Research*, 2(9), 598-604.
21. Baniasadi, F., Saffari, V. R., & Maghsoudi Moud, A. A. (2018). Physiological and growth responses of *Calendula officinalis* L. plants to the interaction effects of polyamines and salt stress. *Scientia Horticulturae*, 234, 312-317.
22. Ibrahim, F., & El Habbasha, E. S. (2015). Chemical composition, medicinal impacts and cultivation of camelina (*Camelina sativa*): Review. 8, 114-122.

23. Angelini, L. G., Abou Chehade, L., Foschi, L., & Tavarini, S. (2020). Performance and potentiality of camelina (*Camelina sativa* L. crantz) genotypes in response to sowing date under mediterranean environment. *Agronomy*, 10(12), 1929.
24. Keshavarz, H. (2020). Study of water deficit conditions and beneficial microbes on the oil quality and agronomic traits of canola (*Brassica napus* L.). *Grasas y Aceites*, 71(3), e373.
25. Heydarian, Z., Yu, M., Gruber, M., Coutu, C., Robinson, S. J., & Hegedus, D. D. (2018). Changes in gene expression in *Camelina sativa* roots and vegetative tissues in response to salinity stress. *Scientific Reports*, 8(1), 9804.
26. Kazemi, S., Rafati Alashti, M., & Hosseini, S. J. (2022). Response of Biochemical and Physiological Properties of camellia (*Camelina sativa* L.) to Foliar Application of Calcium and Silicon Nanoparticles. *Silicon*, 14(12), 6817-6828.
27. Alizadeh, A. (2000). The relationship between water, soil and plants. Mashhad: Astan Quds Publications. Emam RezaUniv, 616p. (In Persian)
28. William, H. (2000). Official methods of analysis of AOAC international. 17nd ed. Association Official Analytical Chemists. USA. 100.
29. Gholamian, S. M., Ghamarnia, H., & Kahrizy, D. (2017). Effects of saline water on Camelina (*Camelina sativa*) yield in Greenhouse condition. *Water and Irrigation Management*, 7(2), 333-348.
30. Kaya, C., Ashraf, M., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2020). The role of endogenous nitric oxide in salicylic acid-induced up-regulation of ascorbate-glutathione cycle involved in salinity tolerance of pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 147, 10-20.
31. Talaat, N. B., Mahmoud, A. W. M., & Hanafy, A. M. A. (2022). Co-application of salicylic acid and spermine alleviates salt stress toxicity in wheat: growth, nutrient acquisition, osmolytes ccumulation, and antioxidant response. *Acta Physiologiae Plantarum*, 45(1), 1.
32. Aelaei, M., Karami, Z., Arghavani, M., & Salehi, F. (2021). The Study of effects of spermine under salinity stress on orphophysiological characteristics of *Catharanthus roseus* L. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 52(3), 553-564.
33. Zlatev, Z., & Yordanov, I. (2004). Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. *Journal of Plant Physiology*, 30, 3-4.
34. Ashraf, M. (2001). Relationships between growth and gas exchange characteristics in some salt-tolerant amphidiploid Brassica species in relation to their diploid parents. *Environmental and Experimental Botany*, 45, 155-163.
35. Alamer, K. H., Perveen, S., Khaliq, A., Zia Ul Haq, M., Ibrahim, M. U., & Ijaz, B. (2022). Mitigation of salinity stress in maize seedlings by the application of vermicompost and sorghum water extracts. *Plants*, 11(19), 2548.
36. Rostampour, P., Hamidian, M., Dehnavi, M. M., & Saeidimajd, G. A. (2023). Evaluation of osmoregulation and morpho-physiological responses of Borago officinalis under drought and salinity stress with equal osmotic potential. *Biochemical Systematics and Ecology*, 106, 104567.
37. Abbas, M., Younis, M., & Shukry, W. (1991). Plant growth, metabolism and adaptation in relation to stress conditions. XIV. Effect of salinity on the internal solute concentrations in *Phaseolus vulgaris. Journal of Plant Physiology*, 138(6), 722-727.
38. Moradi, S., Jahanban, L., & Basaki, T. (2022). Concentration of micronutrient in Azola at cadmium and salinity contaminated environment. *Human & Environment*, 20(3), 217-230.
39. Bardel, J., Ghanbari, A., & Khajeh, M. (2016). Physiological response and polyamines content of cumin (*Cuminum cyminum* L.) to water irrigation quality in the application of chemical and organic fertilizers. *Iranian Journal of*

Medicinal and Aromatic Plants Research, 32(2), 360-375.

40. Hussain, S., Shaukat, M., Ashraf, M., Zhu, C., Jin, Q., & Zhang, J. (2019). Salinity stress in arid and semi-arid climates: Effects and management in field crops. *Climate Change and Agriculture*, 13.
41. Hezaveh, T. A., Rahmani, F., Alipour, H., & Pourakbar, L. (2020). Effects of foliar application of ZnO nanoparticles on secondary metabolite and micro-elements of camelina (*Camelina sativa* L.) under salinity stress. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 16(4), 54-69.
42. Epstein, E. (1998). How Calcium Enhances Plant Salt Tolerance. *Science*, 280(5371), 1906-1907.
43. Turhan, E., & Eris, A. (2004). Effects of sodium chloride applications and different growth media on ionic composition in strawberry plant. *Journal of Plant Nutrition*, 27, 1653-1665.
44. Billard, V., Maillard, A., Coquet, L., Jouenne, T., Cruz, F., Garcia-Mina, J. M., Yvin, J. C., Ourry, A., & Etienne, P. (2016). Mg deficiency affects leaf Mg remobilization and the proteome in Brassica napus. *Plant Physiology and Biochemistry*, 107, 343-373.
45. Wolf, F. I., & Trapani, V. (2007). Cell (patho) physiology of magnesium. *Clinical Science*, 114(1), 27-35.
46. Miura, K. (2013). Nitrogen and Phosphorus Nutrition Under Salinity Stress, in Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress, P. Ahmad, M.M. Azooz, and M.N.V. Prasad, Editors., Springer New York: New York, NY. 425-441.
47. Yildirim, E., Karlidag, H., & Turan, M. (2009). Mitigation of salt stress in strawberry by foliar K, Ca and Mg nutrient supply. *Plant, Soil and Environment*, 55, 213-221.
48. Momenpour, A., Bakhshi, D., Imani, A., & Rezaie, H. (2015). Effect of salinity stress on growth characteristics and concentrations of nutrition elements in almond 'Shahrood 12', 'Touno' cultivars and '1-16' genotype budded on GF677 rootstock. *Journal of Crops Improvement*, 17(1), 197-216.
49. Pashangeh, Z., Abdolahi, F., & Ghasemi, M. (2020). The interaction of salinity and gibberellin on leaf abscission, dry matter, antioxidant enzymes activity and ion content in guava (*Psidium guajava* L). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 33(4), 809-826.
50. Askari, M., Amini, F., & Jamali, F. (2015). Effects of zinc on growth, photosynthetic pigments, proline, carbohydrate and protein content of Lycopersicum esculentum under salinity. *Journal of Plant Process and Function*, 3, 45-58.
51. Farahat, M. M., Ibrahim, M. M., Taha, L., & El-Quesni, E. M. (2007). Response of vegetative growth and some chemical constituents of *Cupressus sempervirens* L. to foliar application of ascorbic acid and zinc at Nubaria. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3, 496-502.
52. Siddiqui, S. N., Umar, S., & Iqbal, M. (2015). Zinc-induced modulation of some biochemical parameters in a high- and a low-zinc-accumulating genotype of *Cicer arietinum* L. grown under Zn-deficient condition. *Protoplasma*, 252(5), 1335-1345.
53. Mateos-Naranjo, E., Redondo-Gómez, S., Cambrollé, J., Luque, T., & Figueroa, M. (2008). Growth and photosynthetic responses to zinc stress of an invasive cordgrass, Spartina densiflora. *Plant Biology*, 10(6), 754-762.
54. Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 651-681.
55. Nenova, V. (2008). Growth and mineral concentrations of pea plants under different salinity levels and iron supply. *General and Applied Plant Physiology*, 34(3-4), 189-202.
56. Iqbal, M., & Ashraf, M. (2005). Changes in growth, photosynthetic capacity and ionic relations in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) due to pre-sowing seed treatment with polyamines. *Plant Growth Regulation*, 46(1), 19-30.

57. Kamiab, F., Talaie, A., Khezri, M., & Javanshah, A. (2014). Exogenous application of free polyamines enhance salt tolerance of pistachio (*Pistacia vera* L.) seedlings. *Plant Growth Regulation*, 72, 257-268.
58. Sajid Aqeel Ahmad, M., Javed, F., & Ashraf, M. (2007). Iso-osmotic effect of NaCl and PEG on growth, cations and free proline accumulation in callus tissue of two indica rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Plant Growth Regulation*, 53(1), 53-63.
59. Wu, Y., Hu, Y., & Xu, G. (2008). Interactive effects of potassium and sodium on root growth and expression of K/Na transporter genes in rice. *Plant Growth Regulation*, 57(3), 271-280.
60. Patel, P., Kajal, S., Patel, V., Patel, V., & Kristi, S. S. (2010). Impact of salt stress on nutrient uptake and growth of cowpea. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 22, 43-48.
61. Netondo, G., Onyango, J. C., & Beck, E. (2004). Sorghum and salinity: I. Response of growth, water relations, and ion accumulation to NaCl salinity. *Crop Science*, 44, 797-805.
62. Ketehouli, T., Idrice Carther, K. F., Noman, M., Wang, F. W., Li, X. W., & Li, H. Y. (2019). Adaptation of plants to salt stress: Characterization of Na+ and K+ transporters and role of CBL gene family in regulating salt stress response. *Agronomy*, 9(11), 1-32.
63. Farsaraei, S., Mehdizadeh, L., & Moghaddam, M. (2021). Seed priming with putrescine alleviated salinity stress during germination and seedling growth of medicinal pumpkin. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 1782-1792.
64. Raziq, A., Mohi Ud Din, A., Anwar, S., Wang, Y., Jahan, M. S., He, M., Ling, C. G., Sun, J., Shu, S., & Guo, S. (2022). Exogenous spermidine modulates polyamine metabolism and improves stress responsive mechanisms to protect tomato seedlings against salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 187, 1-10.
65. Iqbal, M., & Ashraf, M. (2010). Changes in hormonal balance: a possible mechanism of pre-sowing chilling-induced salt tolerance in spring wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196(6), 440-454.