Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

Print ISSN: 2322-2050
Online ISSN: 2322-2778

Effect of sodium nitroprusside (SNP) on physiological-morpho characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.) under salinity stress

Kolsoum Arshan[1], Davood Samsampour[*2], Hossein Pasalari[3]

1. M.Sc., Dept. of Horticulture Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resource, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran. E-mail: kolsoum.arshan93@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Horticulture Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resource, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran. E-mail: samsampoor@hormozgan.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Agriculture, Production Engineering and Plant Breeding Group, Minab Higher Education Center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran. E-mail: hpasalary@yahoo.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 05.22.2021
Revised: 06.19.2021
Accepted: 09.14.2021

Keywords:
Antioxidant,
Carotenoid,
Chlorophyll,
Proline

ABSTRACT

Background and Objectives: Due to the extent of salinity in Iranian soils, the high salinity of water and soil can limit crop quality and productivity. On the other hand, due to the increasing global demand for the use of medicinal plants such as peppermint, today the use of sodium nitroprusside is one of the new strategies to improve and increase the yield of plants in adverse environmental conditions such as water and soil salinity. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of sodium nitroprusside (SNP) on the morphophysiological characteristics of peppermint (*Menthapiperita* L.) under salinity stress.

Materials and Methods: This experiment was performed in the greenhouse of Hormozgan University as a factorial in a completely randomized design with three replications in 1400. In this study, two factors of sodium nitroprusside (0, 0.1, and 0.2 mmol) and salinity levels (0, 25, 50, 75, and 100 mmol) were studied. Rhizomes 4 cm long were selected and planted in pots with a diameter of 20 cm and a height of 18 cm. After plant growth, the leaves were sprayed with 200 ml of sodium nitroprusside solution. Control plants were sprayed using distilled water. Foliar application was performed with an interval of three days at a rate of 10 ml per pot and once every three days. 24 hours after the last foliar application and two months after planting, the plants were treated with salinity. Twenty days after application of stress, plants were harvested and traits were evaluated.

Results: The results showed that the presence of 0.2 mM sodium nitroprusside compared to its absence caused a significant increase in leaf length, leaf width, chlorophyll a, b, carotenoid and proline to the extent of (80.60, 65.38, 150.70 38, 120 and 101.13 percent) in 100 mM salt stress. While it was observed that the use of 0.1 mM sodium nitroprusside decreased ion leakage by 365.90% at 100 mM salinity stress compared to the control.

Conclusion: Therefore, according to the results of the present research, it is possible to recommend foliar spraying of sodium nitroprusside to reduce the negative effects of salinity stress in peppermint plants.

Cite this article: Arshan, Kolsoum, Samsampour, Davood, Pasalari, Hossein. 2023. Effect of sodium nitroprusside (SNP) on physiological-morpho characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.) under salinity stress. *Journal of Plant Production Research*, 30 (1), 85-102.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JOPP.2022.20194.2931
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۵۰
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۷۸

اثر سدیم نیتروپروساید (SNP) بر خصوصیات ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت تنش شوری

کلثوم ارشان[۱]، داود صمصام‌پور*[۲]، حسین پاسالاری[۳]

۱. کارشناسی‌ارشد گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
رایانامه: kolsoum.arshan93@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
رایانامه: samsampoor@hormozgan.ac.ir

۳. استادیار گروه کشاورزی، گروه مهندسی تولید و اصلاح نباتات، مرکز آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
رایانامه: hpasalary@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳

واژه‌های کلیدی:
آنتی‌اکسیدان،
پرولین،
کاروتنوئید،
کلروفیل

چکیده

سابقه و هدف: با توجه به میزان گستردگی شوری در خاک‌های ایران، میزان بالای شوری آب و خاک می‌تواند کیفیت محصول و بهره‌وری را محدود کند. از سوی دیگر با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای استفاده از گیاهان دارویی از جمله نعناع فلفلی، امروزه استفاده از سدیم نیتروپروساید یکی از راهبردهای نوین برای بهبود و افزایش عملکرد گیاهان در شرایط نامطلوب محیطی مانند شوری آب و خاک است. بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی اثر سدیم نیتروپروساید (SNP) بر خصوصیات ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت تنش شوری اجرا شد.

مواد و روش‌ها: این آزمایش در گلخانه دانشگاه هرمزگان به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۰ انجام شد. در این پژوهش دو عامل سدیم نیتروپروساید (۰، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌مولار) و سطوح شوری (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌مولار) مورد مطالعه قرار گرفت. ریزوم‌هایی به‌طول ۴ سانتی‌متر انتخاب شده و در گلدان‌هایی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر کاشته شدند. در هر گلدان ۴ ریزوم کاشته شد. پس از رشد گیاه (۸ برگی)، برگ‌های گیاه با ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول سدیم نیتروپروساید محلول‌پاشی شدند. گیاهان شاهد با استفاده از آب مقطر محلول‌پاشی شدند. عمل محلول‌پاشی ۳ بار در اوایل صبح به میزان ۱۰ میلی‌لیتر به هر گلدان و با فاصله زمانی سه روز انجام شد. ۲۴ ساعت پس از آخرین محلول‌پاشی و دو ماه پس از کاشت، گیاهان تحت تیمار شوری قرار گرفتند. ۲۰ روز پس از اعمال تنش، بوته‌ها برداشت شده و ارزیابی صفات انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار در مقابل عدم حضور آن سبب افزایش معنی‌دار طول برگ، عرض برگ، کلروفیل a، b، کاروتنوئید و پرولین به میزان (۸۰/۶۰، ۶۵/۳۸، ۱۵۰، ۳۸/۷۰ و ۱۲۰ و ۱۰۱/۱۳ درصد) در تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار شده است. در حالی‌که مشاهده شد کاربرد سدیم نیتروپروساید ۰/۱ میلی‌مولار سبب کاهش نشت یونی به میزان ۳۶۵/۹۰ درصد در تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار در مقایسه با شاهد شده است.

نتیجه‌گیری: بنابراین با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان محلول‌پاشی سدیم تیتروپروساید را جهت کاهش اثرات منفی تنش شوری در گیاه نعناع فلفلی توصیه نمود.

استناد: ارشان، کلثوم، صمصام‌پور، داود، پاسالاری، حسین (۱۴۰۲). اثر سدیم نیتروپروساید (SNP) بر خصوصیات ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت تنش شوری. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۰ (۱)، ۱۰۲-۸۵.

DOI: 10.22069/JOPP.2022.20194.2931

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

گیاهان دارویی و معطر در صنایع غذایی، عطرسازی و داروسازی کاربرد فراوان دارند. مواد مؤثره گیاهان دارویی اگرچه اساساً با هدایت فرآیندهای ژنتیکی ساخته می‌شوند اما سنتز آن‌ها به‌طور بارزی تحت‌تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد به‌طوری که فاکتورهای مختلف زیستی و غیرزیستی از جمله عوامل مهم تأثیرگذار روی رشد، کمیت و کیفیت متابولیت‌های ثانوی گیاهان دارویی می‌باشند (۱ و ۲).

شوری یکی از تنش‌های محیطی است که موجب بروز اختلالاتی در فرآیندهای حیاتی گیاه مثل جذب و انتقال مواد غذایی، تعرق و فتوسنتز شده و نیز فرآیندهای بیوشیمیایی (بیوسنتز متابولیت‌های اولیه و ثانویه) و فیزیولوژیک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۳). تولید اسانس در گیاهان دارویی و معطر علاوه بر کنترل ژنتیکی، تحت‌تأثیر عوامل محیطی قرار دارد (۴). همواره رشد و عملکرد گیاهان توسط تنش‌های محیطی زنده و غیرزنده متعدد محدود می‌شود. در بین تنش‌های غیرزنده، تنش شوری در سطح جهان خسارات فراوانی به گیاهان وارد نموده است. مهم‌ترین واکنش گیاه به تنش شوری، کاهش رشد است. تنش شوری مانند بسیاری از تنش‌های دیگر رشد گیاهان را محدود می‌کند. کاهش رشد یک نوع سازگاری برای زنده ماندن گیاه در شرایط تنش است (۵). تأثیر تنش شوری بر رشد گیاه شامل ایجاد تنش اسمزی، سمیت یون‌ها و کمبود مواد مغذی در گیاه است (۶ و ۷). تنش شوری، رشد رویشی و زایشی گیاه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و بنابراین موجب کاهش وزن خشک و عملکرد گیاه می‌شود (۸).

ترکیبات طبیعی و مصنوعی متعددی برای تنظیم ویژگی‌های فیزیولوژیک و زیست شیمیایی گیاهان تحت تنش‌های محیطی مختلف وجود دارند. سدیم نیتروپروساید (SNP) با کاهش تنش شوری از طریق تنظیم ویژگی‌های فیزیولوژیک (محتوای کلروفیل محتوای نسبی آب برگ و نشت الکترولیت) (۹) و بیوشیمیایی (مالون دی‌آلدئید، پرولین، فنول‌ها و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی) گیاهان (۱۰) نقش مهمی در مقابله با تنش شوری ایفا می‌کند. از آن‌جایی‌که تاکنون هیچ گزارشی مبنی بر به‌کارگیری سدیم نیتروپروساید در گیاه نعناع فلفلی در شرایط تنشی وجود ندارد بنابراین هدف از این پژوهش، بررسی تیمار سدیم نیتروپروساید بر رشد، خصوصیات ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه نعناع فلفلی تحت تنش شوری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تیمار و سه تکرار در گلخانه دانشگاه هرمزگان در سال ۱۴۰۰ انجام شد. به‌منظور کشت، ابتدا ریزوم‌های نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) از مزرعه تحقیقاتی پاکان گیاه در شیراز تهیه شدند.

عملیات کاشت: ریزوم‌هایی به‌طول ۴ سانتی‌متر انتخاب شده و در گلدان‌هایی به‌قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر کاشته شدند. بستر کشت هر گلدان مخلوطی از خاک زراعی، ماسه و کود دامی پوسیده به نسبت ۱:۳:۶ بود. برای هر تیمار ۳ گلدان به‌عنوان ۳ تکرار در نظر گرفته شد. در هر گلدان ۴ ریزوم کاشته شد (۱۱).

روش اندازه‌گیری ظرفیت مزرعه: مقدار آب مورد نیاز برای آبیاری با آب شور بر اساس مقدار اختلاف وزن خاک گلدان از وزن مرجع در ۷۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک انجام شد. برای تعیین مقدار آب مورد نیاز آبیاری ابتدا گلدان‌ها وزن شد و سپس از طریق اختلاف وزن اندازه‌گیری شده با وزن گلدان در ظرفیت زراعی و در نظر گرفتن تیمارها، میزان آب لازم برای آزمایش به‌دست آمد (۱۲).

$$SWG = (FW-DW)/DW \times 100 \quad (1)$$

که در آن، FW وزن تر، DW وزن خشک.

اعمال تیمار سدیم نیتروپروساید و شوری به گیاه نعناع فلفلی: تیمار شوری در ۵ سطح (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) و سدیم نیتروپروساید در ۳ سطح (۰، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌مولار) در نظر گرفته شد. پس از رشد گیاه، برگ‌های گیاه با ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول سدیم نیتروپروساید محلول‌پاشی شدند. گیاهان شاهد با استفاده از آب مقطر محلول‌پاشی شدند. عمل محلول‌پاشی با فاصله زمانی سه روز در اوایل صبح به میزان ۱۰ میلی‌لیتر به هر گلدان انجام شد. دو ماه پس از کاشت، به‌طوری‌که ۲۴ ساعت از آخرین محلول‌پاشی گذشته بود، گیاهان تحت تیمار شوری قرار گرفتند.۲۰ روز پس از اعمال تنش، بوته‌ها برداشت شده و ارزیابی صفات انجام گرفت.

اندازه‌گیری صفات

طول و عرض برگ و قطر ساقه: برای اندازه‌گیری ارتفاع ساقه، طول و عرض برگ گیاه از خط‌کش میلی‌متری استفاده شد. برای اندازه‌گیری قطر ساقه از کولیس استفاده شد.

وزن تر و خشک برگ و ریشه: برگ‌ها و ریشه‌ها هر گیاه به‌طور جداگانه برداشت و با آب مقطر استریل شستشو گردید. برای اندازه‌گیری وزن تر گیاه از ترازو دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد آون قرار گرفته و وزن خشک آن‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد.

کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید: برای اندازه‌گیری کلروفیل a، b، کلروفیل کل و محتوای کاروتنوئیدها ابتدا ۰/۲۵ گرم برگ تازه را خرد و آن را در یک هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد سائیده تا به‌صورت توده یکنواخت گردد، سپس مخلوط حاصل به‌مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور سانتریفیوژ شد. میزان جذب نور محلول رویی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV1100 در طول موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵، ۶۵۲ و ۶۶۳ نانومتر قرائت گردید (۱۳).

نشت یونی: برای تعیین درصد نشت الکترولیت، نیم گرم برگ با آب مقطر شسته شده و در لوله‌های حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار داده شد. لوله‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در محیط تاریک روی شیکر قرار گرفتند و میزان هدایت الکتریکی اولیه (EC_1) با استفاده از دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد (۱۴). نمونه‌ها سپس به‌مدت ۱۵ دقیقه در اتوکلاو با دمای ۱۲۱ درجه و فشار ۱/۵ اتمسفر قرار داده شدند و بعد از خنک شدن در دمای اتاق، هدایت الکتریکی بیشینه (EC_2) اندازه‌گیری و درصد نشت الکترولیت با استفاده از معادله زیر با روش (۱۴) محاسبه شد:

$$EL= (EC_1/EC_2) \times 100 \quad (2)$$

پرولین: نیم گرم بافت تازه برگ همراه با ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالیسیلیک اسید ۳ درصد، دو میلی‌لیتر استیک اسید و ۲ میلی‌لیتر نین‌هیدرین ترکیب و در حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفت. سپس به‌منظور خنک شدن نمونه‌ها، به داخل آب و یخ منتقل شدند. میزان جذب نوری مخلوط واکنش در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر ثبت گردید (۱۵).

کاتالاز: آنزیم کاتالاز H_2O_2 را بدون نیاز به فاکتور احیاکننده، به اکسیژن و آب تبدیل می‌کند. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از روش حسنی‌زامن و همکاران (۱۶) انجام شد. بدین‌منظور، ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات pH=۷ ۵۰ میلی‌مولار، ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی، ۵ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ H_2O_2 درصد به آن اضافه شد و میزان جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر به‌مدت دو دقیقه با فواصل زمانی ۲۰ ثانیه‌ای ثبت گردید.

ظرفیت ضداکسایشی: جهت اندازه‌گیری ظرفیت ضداکسایشی، سه میلی‌لیتر متانول ۸۵ درصد به ۰/۵ گرم بافت تازه برگ کوبیده در نیتروژن مایع اضافه کرده، سپس به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۰ هزار دور در دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. ابتدا ۲۰۰ میکرولیتر عصاره تهیه شده از بافت برگ را با ۵۰۰ میکرولیتر آب مخلوط کرده و به‌مدت ۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. محلول حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق و تاریکی قرار گرفت و جذب عصاره در طول موج ۵۱۷ نانومتر با اسپکتروفتومتر قرائت شد (۱۷).

تجزیه آماری: داده‌های حاصل با استفاده نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین صفات با آزمون LSD در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شد.

نتایج

طول و عرض برگ و قطر ساقه: اثر متقابل شوری و محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید بر طول و عرض برگ و قطر ساقه گیاه نعناع فلفلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین طول برگ به‌ترتیب در حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار و عدم حضور (تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار) به میزان ۵/۱۷ و ۳/۲۷ سانتی‌متر مشاهده شد. هم‌چنین بیش‌ترین و کم‌ترین عرض برگ به‌ترتیب در حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار و عدم حضور (تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار) به میزان ۴/۳۰ و ۳ سانتی‌متر مشاهده شد. در مجموع کاربرد سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار سبب افزایش طول و عرض برگ به‌ترتیب به میزان ۵۵/۹۶ و ۱۶/۶۶ درصد در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار در مقایسه با شاهد شد. بیش‌ترین و کم‌ترین قطر ساقه به‌ترتیب به میزان ۰/۵۰ و ۰/۲۶ سانتی‌متر در حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۲ درصد در مقایسه با عدم حضور (سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار) مشاهده شد. کاربرد سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار باعث افزایش قطر ساقه به میزان ۶۵/۳۸ درصد در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار در مقایسه با شاهد شد (جدول ۲). زهی (۱۸) بیان کردند که شوری منجر به بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش جذب دی‌اکسید کربن می‌شود و این کاهش موجب تأمین ناکافی کربن برای رشد می‌شود. شوری با کاهش سنتز تحریک‌کننده‌های رشد گیاه مانند سیتوکنین و افزایش بازدارنده‌های رشد مانند آبسیزیک اسید باعث کاهش رشد گیاه می‌شود (۱۹). به‌نظر می‌رسد سدیم نیتروپروساید به علت نقش اساسی در کاهش مقدار پراکسیداسیون لیپیدی و خسارت به رنگیزه‌ها در مقابل تنش اکسیدانی و هم‌چنین تقویت فعالیت‌های بیولوژیک مانند رشد و نمو، فتوسنتز، جذب و انتقال یون‌ها و تغییر فعالیت برخی آنزیم‌های مهم (۲۰) موجب بهبود تجمع ماده خشک گیاه نعناع فلفلی در بستر شور شده باشد. در پژوهشی گزارش شده است که کاربرد سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار میتواند باعث افزایش میزان وزن خشک برگ و ریشه در گیاه سرخارگل تحت تنش شوری شود (۲۱). در گزارش دیگری نقش مثبت سدیم نیتروپروساید روی فلفل (*Capsicum annuum*) عبدال‌الطیف و چاوکینک (۲۲) و برنج (*Oryza sativa*) مصطفی و همکاران (۲۳) مشاهده شد که همسو با پژوهش حاضر است.

وزن تر و خشک برگ و ریشه: با توجه به جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داده شد که اثر متقابل تنش شوری و محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید بر وزن تر و خشک برگ و ریشه نعناع فلفلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین وزن تر برگ در حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌مولار و عدم حضور (تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار) به‌ترتیب

به‌میزان ۰/۰۹۵، ۰/۰۸۸ و ۰/۰۲۳ گرم مشاهده شد. هم‌چنین بیش‌ترین و کم‌ترین وزن خشک برگ به‌ترتیب در حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۱ میلی‌مولار و عدم حضور (تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار) به میزان ۰/۰۱۵۰ و ۰/۰۰۲۰ گرم مشاهده شد. در مجموع کاربرد سدیم نیتروپروساید ۰/۲ و ۰/۱ میلی‌مولار به‌ترتیب سبب افزایش وزن تر و خشک برگ به میزان یک و دو برابر در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار نسبت به شاهد شد. بیش‌ترین و کم‌ترین وزن تر ریشه به‌ترتیب به میزان ۷۳/۴۰ و ۵۲/۶۷ گرم در حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۲ درصد در مقایسه با شاهد مشاهده شد. بیش‌ترین و کم‌ترین وزن خشک ریشه به‌ترتیب در حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌مولار به میزان ۵/۱۲ و ۲/۴۶ گرم مشاهده شد. کاربرد سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار باعث افزایش وزن تر ریشه به میزان ۴/۱۵ درصد و کاهش وزن خشک به میزان ۴۰/۵۷ درصد در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار در مقایسه با شاهد شد (جدول ۲). کلرید سدیم اثر مخرب سدیم در غشا سیتوپلاسمی سلول است که منجر به کاهش جوانه‌زنی و رشد گیاهچه می‌شود. پژوهش‌های زیادی بر کاهش وزن تر و خشک ریشه‌چه انجام شده است که با نتایج آزمایش ما مطابقت دارد (۲۴، ۲۵ و ۲۶). پژوهش رضاپور و همکاران (۲۷) روی کلزا (*Brassica napus*) اثرات منفی تنش شوری بر وزن تر و خشک گیاهچه و تعدیل آن با کاربرد اکسید نیتریک را نشان داده‌اند. سدیم نیتروپروساید سبب توسعه برگ و ریشه می‌شود و پیری را به تاخیر می‌اندازد و در شرایط تنش‌های مختلف به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدانت عمل می‌کند (۲۸). اثر سدیم نیتروپروساید روی گیاه آفتابگردان توسط اسدی- صنم و همکاران (۲۹) ثابت کرد که وزن تر و خشک ریشه و برگ نسبت به گیاهان تحت تنش شوری افزایش یافته است. کاربرد خارجی سدیم نیتروپروساید از گیاهان در برابر آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش نمک از طریق ترویج بیوسنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و در نتیجه بهبود رشد گیاه در شرایط تنش شوری محافظت می‌کند.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر شوری، سدیم نیتروپروساید و اثر متقابل آن‌ها بر خصوصیات ریخت‌شناسی نعناع فلفلی.

Table 1. Analysis of variance of the effect of salinity, sodium nitroprusside, and their interaction on morphological characteristics of peppermint.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares						
		طول برگ Leaf length	عرض برگ Leaf width	قطر ساقه Stem diameter	وزن تر برگ Leaf fresh weight	وزن خشک برگ Leaf dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
نیتروپروساید Nitroprusside	2	4.88**	2.06**	0.10**	0.000068**	0.000021**	2662.70**	3.40*
شوری Salinity	4	3.50**	2.02**	0.024**	0.0021**	0.000028**	2423.70**	4.53**
نیتروپروساید × شوری Nitroprusside × Salinity	8	0.36**	0.79**	0.008**	0.0033**	0.00012**	549.29**	5.13
خطای آزمایش Error	30	0.055	0.073	0.0017	0.00013	0.0000011	196.34	0.79
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	5.46	7.21	10.96	19.88	11.84	24.33	23.65

** بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

** Indicates a significant difference at the 1% probability level

جدول ۲- مقایسه میانگین صفات ریخت‌شناسی نعناع فلفلی تحت‌تأثیر سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید و شوری.

Table 2. Comparison of average morphological characteristics of peppermint under the influence of different levels of sodium nitroprusside and salinity.

نیتروپروساید (میلی‌مولار) Nitroprusside (mM)	تنش شوری (میلی‌مولار) Salinity stress (mM)	طول برگ (سانتی‌متر) Leaf length (cm)	عرض برگ (سانتی‌متر) Leaf width (cm)	قطر ساقه (سانتی‌متر) Stem diameter (cm)	وزن تر برگ (گرم) Dry weight of leaves (g)	وزن خشک برگ (گرم) Dry weight of leaves (g)	وزن تر ریشه (گرم) Root fresh weight (g)	وزن خشک ریشه (گرم) Root dry weight (g)
شاهد Control	0	4.30 ±0.12^{cd}	4.13±0.072^{ab}	0.40±0.027^{bcd}	0.082±0.001^{ab}	0.012±0.0005^{bc}	52.67±7.21^{a-d}	5.08±0.29^{a}
	25	3.77±0.11^{ef}	4.07±0.054^{abc}	0.37± 0.027^{bcd}	0.063±0.0019^{bcd}	0.011±0.0001^{cd}	39.17±1.93^{cde}	4.99±0.33^{ab}
	50	4.33±0.13^{cd}	3.07±0.027^{ef}	0.33± 0.027^{def}	0.043±0.0033^{def}	0.0057±0.0004^{fg}	32.80±5.28^{de}	2.77±1.07^{de}
	75	3.77±0.11^{ef}	3.03±0.027^{f}	0.30±0.00^{ef}	0.035±0.015^{ef}	0.0047±0.0002^{gh}	59.03±13.37^{abc}	3.37±0.29^{b-e}
	100	3.27±0.11 ^{g}	3.00±0.094^{f}	0.26±0.81^{f}	0.023±0.002^{f}	0.0020±0.000^{i}	70.47±11.40^{a}	4.14±0.76^{a-d}
نیتروپروساید ۰/۱ Nitroprusside 0.1	0	4.83±$^{0.13\ ab}$	4.23±0.11^{ab}	0.40± 0.027^{bcd}	0.095±0.000^{a}	0.0150±0.0004^{a}	35.57±2.39^{cde}	5.12±0.81^{a}
	25	4.23±0.11^{cd}	4.17±0.13^{ab}	0.37± 0.027^{cde}	0.078±0.002^{abc}	0.0123±0.0002^{bc}	26.37±2.83^{e}	2.91±0.31^{cde}
	50	3.57±0.09^{fg}	3.57±0.19^{cde}	0.33± 0.027^{def}	0.044±0.006^{bef}	0.0097±0.0005^{de}	41.83±7.75^{ab-e}	2.92±0.21^{cde}
	75	4.17±0.13^{de}	3.60±0.24^{cd}	0.30±0.00^{ef}	0.048±0.007^{de}	0.0087±0.0007^{e}	28.57±2.90^{de}	3.99±0.34^{a-e}
	100	4.67±0.13^{bc}	3.43±0.23^{def}	0.27±0.027^{f}	0.044±0.006^{def}	0.0067±0.0007^{f}	42.27±1.71^{b-e}	4.52±0.26^{abc}
نیتروپروساید ۰/۲ Nitroprusside 0.2	0	5.17±0.1^{3a}	4.30±0.12^{a}	0.50±0.00^{a}	0.088±0.0012^{a}	0.0103±0.0002^{de}	47.50±2.07^{a-e}	3.06±0.36^{cde}
	25	4.97±0.07^{ab}	4.20±0.12^{ab}	0.47±0.027^{ab}	0.064±0.0024^{bcd}	0.0103±0.0004^{de}	31.17±7.27^{de}	4.30±0.38^{a-d}
	50	4.27±0.11 ^{cd}	4.17±0.13^{ab}	0.43±0.027^{abc}	0.059±0.0021^{cd}	0.0093±0.000^{de}	43.97±4.44^{b-e}	3.50±0.17^{a-e}
	75	4.37±0.19^{cd}	3.77±0.11^{bcd}	0.43±0.027^{abc}	0.059±0.0029^{cd}	0.0087±0.0007^{e}	62.17±9.50^{ab}	3.58±0.18^{a-e}
	100	5.10±0.04^{ab}	3.50±0.19^{def}	0.43±0.027^{abc}	0.046±0.001^{de}	0.0033±0.0005^{hi}	73.40±1.88^{a}	2.46±0.33^{e}

میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند

Averages with the same letters do not have a significant difference at the five percent probability level

کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید: نتایج داده‌های به‌دست آمده براساس تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سطوح شوری و محلول‌پاشی نیتروپروساید بر کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین میزان کلروفیل a، b و کاروتنوئید (۰/۵۵، ۰/۸۰ و ۰/۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مربوط به تیمار سدیم نیتروپروساید ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۱ میلی‌مولار و شوری صفر بود. کم‌ترین کلروفیل a، b و کاروتنوئید به‌ترتیب به میزان ۰/۰۸۶، ۰/۳۱ و ۰/۱۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در عدم حضور سدیم نیتروپروساید و شوری ۱۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد. هم‌چنین نتایج نشان داد در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار کاربرد سدیم نیتروپروساید با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۱ میلی‌مولار به میزان ۱۵۰، ۳۸/۷۰ و ۱۲۰ درصد افزایش کلروفیل a، b و کاروتنوئید نسبت به شرایط عدم حضور آن در همان سطح شوری شد (شکل ۱). در پژوهشی گیریرانی و همکاران (۳۰) بیان کرد که کاروتنوئیدهای درگیر در مکانیسم‌های تنظیم‌کننده محافظت نوری در برابر اکسیداسیون خودکار نقش کلیدی در مرکز واکنش فتوسنتزی دارند. نتایج به‌دست آمده در مطالعه حاضر را می‌توان با نقش قوی اکسید نیتریک در مهار گونه‌های اکسیژن فعال و در نتیجه کاهش آسیب اکسیداتیو در دستگاه فتوسنتزی و افزایش محتوای کلروفیل توضیح داد. هم‌چنین لی و همکاران (۳۱) با کاربرد غلظت ۰/۲ میلی‌مولار سدیم نیتروپروساید، جلوگیری از تخریب کلروفیل و تاخیر در پیری برگ‌های گندم را گزارش کردند. در آزمایش محمدی و همکاران (۳۲) تیمار ۰/۴ میلی‌مولار سدیم نیتروپروساید توانست اثر خسارت‌زای شوری را بهبود بخشد و بیش‌ترین محتوای کاروتنوئید را در بین تیمارهای تنش‌دیده در مقایسه از شاهد (سطح صفر سدیم نیتروپروساید) نشان دهد. کاربرد سدیم نیتروپروساید تحت شرایط شور در مطالعه بویاتشینو و آسافوا (۳۳)، توانست مقدار کلروفیل برگ گندم را افزایش دهد. در بین رنگیزه‌های فتوسنتز، کاروتنوئیدها نقش حفاظتی مهمی در مقابل تنش اکسیداتیو القا شده دارند؛ کاهش این رنگیزه‌ها در تنش شوری و نیز عملکرد صحیح روزنه‌ها با افزایش سدیم در محیط رشد گیاه می‌تواند در نهایت منجر به کاهش فتوسنتز و رشد گیاهچه‌ها شود (۳۴).

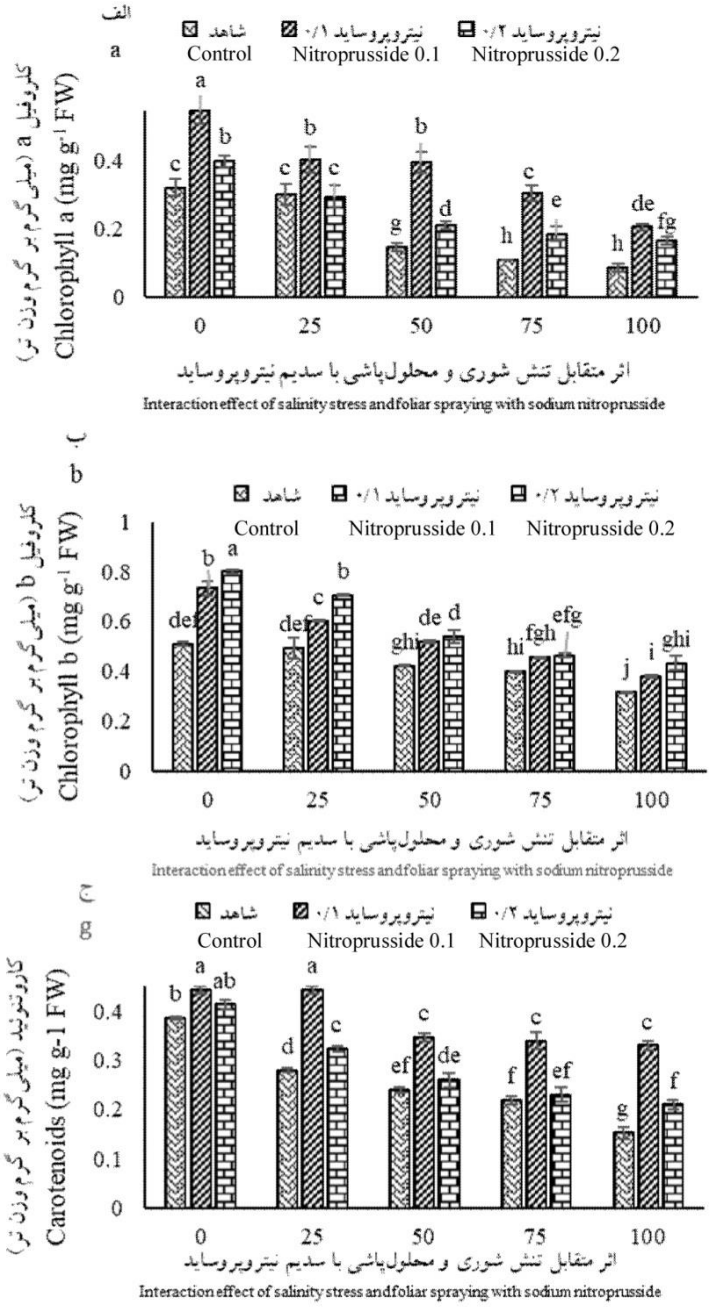
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر شوری و سدیم نیتروپروساید بر خصوصیات فیزیولوژیک و زیست شیمیایی نعناع فلفلی.

Table 3. Variance analysis of the effect of salinity and sodium nitroprusside on the physiological and biochemical characteristics of peppermint.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares						
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کاروتنوئید Carotenoids	نشت یونی	پرولین Proline	کاتالاز Catalase	ظرفیت ضداکسایشی Antioxidant capacity
نیتروپروساید Nitroprusside	2	0.12**	0.075**	0.055**	194.52**	19.51**	0.20**	349.37**
شوری Salinity	4	0.021**	0.037**	0.015**	194.52**	14.40**	0.26**	166.63**
نیتروپروساید × شوری Nitroprusside × Salinity	8	0.046**	0.062**	0.020**	117.9**	10.85**	0.66**	182.65**
خطای آزمایش Error	30	0.00015	0.0011	0.00040	2.73	0.029	0.011	1.67
ضریب تغییرات (درصد) C.V. (%)	-	4.57	6.56	6.43	20.87	4.22	5.59	2.76

** بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

** Indicates a significant difference at the 1% probability level

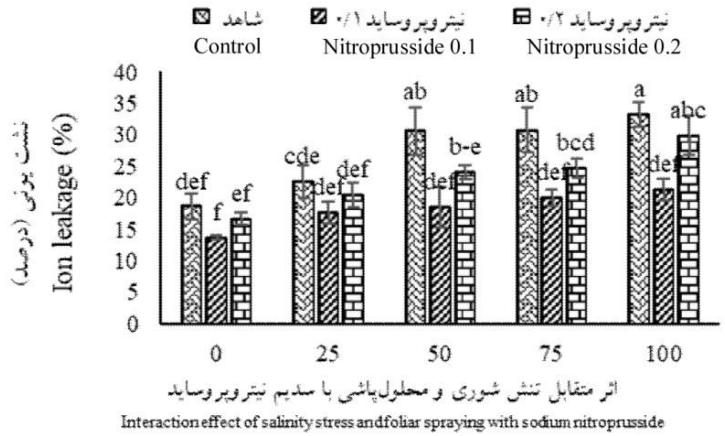


شکل ۱- مقایسه میانگین صفات (الف) کلروفیل a، (ب) کلروفیل b و (د) کاروتنوئید نعناع فلفلی در تیمارهای مختلف اعمال شده (میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند).

Fig. 1. Comparison of the average traits of (a) chlorophyll a, (b) chlorophyll b and (d) carotenoids of peppermint in different treatments. (Means with similar letters do not differ significantly at the 5% probability level).

نشت یونی: با توجه به جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید بر نشت یونی نعناع فلفلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین نشت یونی در گیاه نعناع فلفلی در شاهد و شوری ۱۰۰

میلی‌مولار به‌میزان (۳۳/۲۸ درصد) و کم‌ترین میزان (۲۱/۳۳ درصد) مربوط به حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۱ میلی‌مولار در سطوح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار بود. نتایج نشان داد کاربرد سدیم نیتروپروساید ۰/۱ میلی‌مولار به‌میزان ۳۵/۹۰ درصد نشت یونی گیاه نعناع فلفلی را نسبت به شاهد کاهش داد (شکل ۲). در گیاهان حساس به نمک، تنش شوری باعث کاهش تولید محصول می‌شود. کاهش عملکرد در تیمارهای شوری عمدتاً به دلیل اختلالات شدید در جوانه‌زنی، رشد گیاه، فتوسنتز، تعادل یونی است (۳۵، ۳۶ و ۳۷). شوری با تغییر ساختار و ترکیب لیپیدها و پروتئین‌ها بر یکپارچگی غشای سلولی تأثیر می‌گذارد. غلظت بالای کلرید سدیم باعث کمبود کلسیم در گیاهان و کاهش پایداری غشا می‌شود (۳۸). نتایج مطالعات وانگ و همکاران (۳۹) نشان دادند که استفاده از سدیم نیتروپروساید نرخ نشت الکترولیت و در نتیجه آسیب تنش در موز (*Musa*) را کاهش داد. استفاده از سدیم نیتروپروساید باعث افزایش پایداری غشای سلولی و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر تنش می‌شود که احتمالاً به‌دلیل افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی است (۴۰). هم‌چنین مطالعه فان و همکاران (۴۱) نشان داد که اکسید نیتریک دارای توانایی بازیابی و دفاع از غشای سلولی برای کاهش آسیب در سیستم غشای سلولی با کاهش نفوذپذیری غشاء و پراکسیداسیون لیپیدی غشا است و در نتیجه از نشت الکترولیت جلوگیری می‌کند. اکسید نیتریک یک مولکول سیگنال‌دهی مهم است که در بهبود رشد و نمو گیاهان تحت تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی نقش دارد (۴۲، ۴۳ و ۴۴).

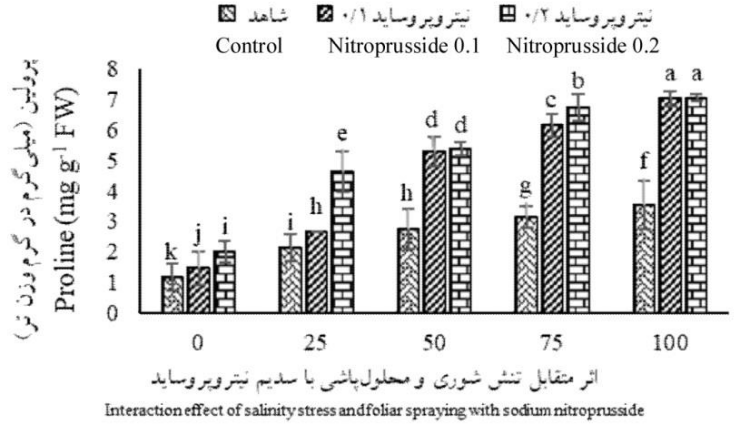


شکل ۲- مقایسه میانگین نشت یونی نعناع فلفلی در تیمارهای مختلف اعمال شده
(میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند).

Fig. 2. Comparison of the average traits of Ion leakage of peppermint in different treatments (Means with similar letters do not differ significantly at the 5% probability level).

پرولین: براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل تنش شوری و محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید بر پرولین نعناع فلفلی درسطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین پرولین به‌ترتیب (۷/۰ و ۷/۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌مولار در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد. هم‌چنین کم‌ترین میزان پرولین در شاهد

به میزان ۱/۱۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر مشاهده شد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تحت تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار، پرولین گیاه نعناع فلفلی در حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌مولار به میزان ۹۸/۳۰ و ۱۰۱/۱۳ درصد افزایش معنی‌دار نسبت به عدم حضور آن نشان داد (شکل ۳). میسرا و ساکسینا (۴۵) پیشنهاد کردند که افزایش محتوای پرولین می‌تواند به دلیل کاهش فعالیت پرولین اکسیداز باشد که منجر به تخریب پرولین در سیستم‌های گیاهی و تغییرات قابل‌توجهی در فعالیت آنزیم‌های سنتز و تجزیه پرولین می‌شود (۴۶ و ۴۷). مشابه نتایج ما، وو و همکاران (۴۸) گزارش کردند که کاربرد اکسید نیتریک باعث افزایش محتوای پرولین در گیاهان گوجه‌فرنگی در شرایط شوری شد. افزایش محتوای پرولین پس از محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید در طول تنش را می‌توان به افزایش فعالیت آنزیم‌های سنتزکننده پرولین و کاهش کاتابولیسم پرولین نسبت داد. اکسید نیتریک باعث تنظیم هموستازی و انتقال آهن داخلی می‌شود که همیشه منجر به تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی همراه با بهبود فعالیت فتوسنتزی می‌شود (۴۹). سدیم نیتروپروساید یک ترکیب آزادکننده نیتریک اکسید در گیاهان است. نشت یونی میزان نیتریک اکسید را افزایش داده، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تجمع تنظیم‌کننده‌های اسمزی مانند پرولین را بیش‌تر می‌کند و در نتیجه محتوای نسبی آب برگ را حفظ و افزایش می‌دهد. در سلول‌های گیاهی، پرولین به‌عنوان متعادل‌کننده اسمزی بین سیتوپلاسم و واکوئل‌ها عمل می‌کند. فعالیت آنزیم گلوتامات لیگاز در شرایط تنش افزایش می‌یابد و گلوتامات پیش‌ساز کلروفیل و پرولین است. به‌طوری که مقدار بیش‌تری برای تولید محتوای پرولین صرف می‌شود (۵۰). سدیم نیتروپروساید خارجی باعث افزایش محتوای پرولین در شرایط تنش شوری می‌شود. منطبق با مطالعه حاضر، نشان داده شده است که استفاده از سدیم نیتروپروساید سطوح املاح سازگار مانند پرولین را افزایش می‌دهد (۵۱). در پژوهشی دیگر نشان داده شد که محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید به گیاه *Abelmoschus esculentus* L. باعث افزایش پرولین در سطح شوری ۲۰۰ میلی‌مولار شد (۵۲).

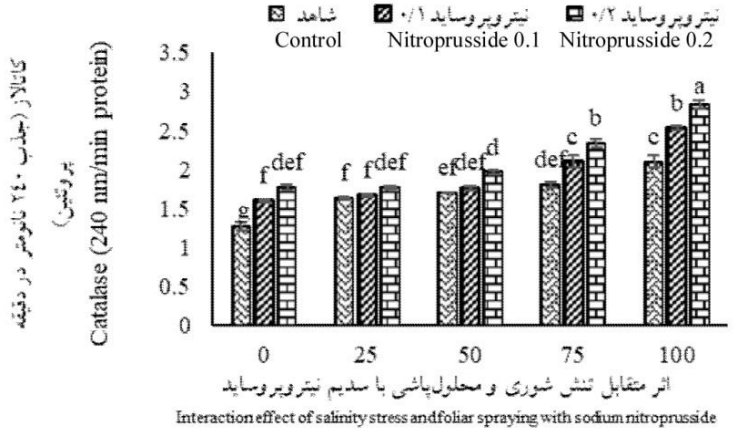


شکل ۳- مقایسه میانگین پرولین نعناع فلفلی در تیمارهای مختلف اعمال شده

(میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند).

Fig. 3. Comparison of average peppermint proline in different applied treatments
(Averages with similar letters do not have significant differences at the five percent probability level).

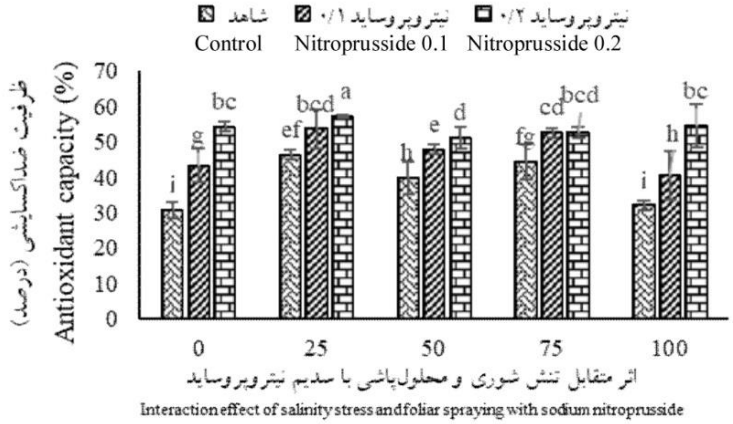
کاتالاز: یافته‌های حاصل از نتایج تجزیه واریانس جدول ۳ نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید، بر کاتالاز نعناع فلفلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین کاتالاز در کاربرد سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار به میزان (۲/۸۳ نانومتر در دقیقه) در سطوح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار و کم‌ترین میزان مربوط به شاهد (۱/۲۶ نانومتر در دقیقه) مشاهده شد. هم‌چنین نتایج مقایسه میانگین نشان داد که حضور سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار نسبت به شاهد در سطوح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار به‌میزان ۳۴/۷۶ درصد افزایش یافت (شکل ۴). داده‌های ثبت شده توسط ژانگ و همکاران (۵۳) نشان داد که اکسید نیتریک (NO) با افزایش فعالیت کاتالاز در میتوکندری به‌عنوان سیگنالی عمل می‌کند که تحمل نمک را القا می‌کند. در شرایط تنش‌زا از کلرید سدیم، واسطه‌های سیگنال‌دهنده مانند گونه‌های اکسیژن فعال بیش از حد تولید می‌شوند و در مرحله سازگاری باعث تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شوند و این با سیستم آنزیم آنتی‌اکسیدانی گیاهان مرتبط است (۵۴). نژادمرادی و همکاران (۵۵) دریافتند که پیش‌تیمار سدیم نیتروپروساید می‌تواند فعالیت آنزیم کاتالاز را در ریشه و برگ گیاهان آفتابگردان افزایش دهد. علاوه‌بر این، کایا و همکاران (۵۶) گزارش کردند که عمل اصلی اکسید نیتریک القای سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاهی با بهبود فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز است. کیاو و همکاران (۵۷) نشان دادند برای که کاهش سطوح گونه‌های اکسیژن فعال، با حذف O_2 و رادیکال‌های آزاد (R)، اکسید نیتریک با تنظیم هموستاز ردوکس، از آسیب اکسیداتیو در گیاهان تحت تنش جلوگیری می‌کند و فعالیت آنزیمی آنزیم‌های مهارکننده H_2O_2 را افزایش می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه میانگین آنزیم کاتالاز نعناع فلفلی در تیمارهای مختلف اعمال شده (میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند).

Fig. 4. Comparison of the average peppermint catalase enzyme in different applied treatments (Means with the same letters do not have a significant difference at the five percent probability level).

ظرفیت ضد اکسایشی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اثر متقابل تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر ظرفیت ضداکسایشی گیاه نعناع فلفلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین ظرفیت ضداکسایشی (۵۷/۲۶ درصد) در کاربرد سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار در سطح شوری ۲۵ میلی‌مولار و کم‌ترین میزان مربوط به عدم حضور سدیم نیتروپروساید (۱/۲۶ درصد) مشاهده شد (شکل ۵). در آزمایشی کانگ و سالتویت (۵۸) گزارش کردند که تنش شوری سبب کاهش ظرفیت اکسایشی در خیار شده است که مشابه یافته‌های پژوهش حاضر می‌باشد. خواص ضداکسایشی اکسید نیتریک به دلیل توانایی آن در مدیریت هموستاز ردوکس سلولی و سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن است (۵۹). اثر سدیم نیتروپروساید بر فعالیت ضداکسایشی گیاه به زمان تیمار، ژنوتیپ و نوع تیمار مورد استفاده بستگی دارد که این نشان‌دهنده اثر مثبت نیتریک اکسید بر ظرفیت ضداکسایشی، در نتیجه افزایش مقاومت به تنش است (۶۰). نتایج ما با نتایج ژانگ و همکاران (۶۱) در ذرت، شی و همکاران (۶۲) در خیار، پاکیش و طباطبائیانی (۶۳) در زردآلو و تان و همکاران (۶۴) در گندم مطابقت داشت.



شکل ۵- مقایسه میانگین ظرفیت ضداکسایشی نعناع فلفلی تحت‌تأثیرتیمارهای اعمال شده (میانگین‌های دارای حروف مشاب هاختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند).

Fig. 5. Comparison of the mean interaction effect of sodium nitroprusside (0, 0.1 and 0.2 mM) and salinity stress (0, 25, 50, 75 and 100 mM) on peppermint antioxidants in greenhouse conditions (Means with similar letters do not differ significantly at the 5% probability level).

نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های به‌دست آمده محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید ۰/۲ میلی‌مولار بر نعناع فلفلی موجب افزایش رشد رویشی و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش نشت یونی تحت تنش شوری در مقایسه با شاهد شد. در کل به‌نظر می‌رسد که نیتریک اکسید حاصل از محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید توانست از راه افزایش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی موجب کاهش خسارت رادیکال‌های آزاد و در نتیجه افزایش تحمل گیاهچه نعناع فلفلی تحت به تنش شوری شود. بنابراین، استفاده از اکسید نیتریک خارجی یا دست‌کاری محتوای اکسید نیتریک درون‌زا ممکن است رویکرد امیدوارکننده‌ای برای مدیریت تنش نمک در عصر تغییرات اقلیمی باشد.

منابع

1.Clark, R.J. and Menary, R.C. 1980. Environmental effects on peppermint (*Mentha piperita* L.). II. Effects of temperature on photosynthesis, photorespiration and dark respiration in peppermint with reference to oil composition. Funct. Plant Biol. 7: 6. 693-69.

2.Russo, A., Formisano, C., Rigano, D., Senatore, F., Delfine, S., Cardile, V., Rosselli, S. and Bruno, M. 2013. Chemical composition and anticancer activity of essential oils of Mediterranean sage (*Salvia officinalis* L.) grown in different environmental conditions. Food Chemi. Tox. 55: 5. 42-47.

3.Hendawy, S.F. and Khalid, K.A. 2005. Response of sage (*Salvia officinalis* L.) plants to zinc application under different salinity levels. J. Appl. Sci. Res. 1: 2. 147-155.

4.Farzaneh, A., Ghani, A. and Azizi, M. 2010. The effect of water stress on morphological characteristics and essential oil content of improved sweet basil (*Ocimumbasilicum* L.). Int. J. Agron. Plant Prod. 17: 1. 103-111. (In Persian)

5.Zhu, J.K. 2001. Plant salt tolerance. Trends Plant Sci. 6: 2. 66-71.

6.Hasegawa, P.M., Bressan, R.A., Zhu, J.K. and Bohnert, H.J. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. Ann. Rev. Plant Biol. 51: 1. 463-499.

7.Roy, P., Niyogi, K., Sengupta, D.N. and Ghosh, B. 2005. Spermidine treatment to rice seedlings recovers salinity stress-induced damage of plasma membrane and PM-bound H^{+}-ATPase in salt-tolerant and salt-sensitive rice cultivars. Plant Sci. 168: 3. 583-591.

8.Kaya, C., Higgs, D. and Kirnak, H. 2001. The effects of high salinity (NaCl) and supplementary phosphorus and potassium on physiology and nutrition development of spinach. Bulg. J. plant physiol. 27: 4. 47-59.

9.Mohasseli, V. and Sadeghi, S. 2019. Exogenously applied sodium nitroprusside improves physiological attributes and essential oil yield of two drought susceptible and resistant specie of *Thymus* under reduced irrigation. Ind. Crops Prod. 130: 2. 130-136.

10.Ali, Q., Daud, M.K., Haider, M.Z., Ali, S., Rizwan, M., Aslam, N., Noman, A., Iqbal, N., Shahzad, F., Deeba, F. and Ali, I. 2017. Seed priming by sodium nitroprusside improves salt tolerance in wheat (*Triticumae stivum* L.) by enhancing physiological and biochemical parameters. Plant Physiol. Biol. 119: 5. 50-58.

11.Mohammadi, Y. and Khorsandnia, Z. 2022. The effects of drought, salinity, and temperature stresses on the expression of menthone menthol reductase gene in Peppermint (*Mentha piperita* L.). Iran. J. of Range. and Fore. Plant Breed. Gene. Res. 29: 2. 196-206. (In Persian)

12.Sepaskhah, A.R. and Bazrafshan-Jahromi, A.R. 2006. Controlling runoff and erosion in sloping land with polyacrylamide under a rainfall simulator. Biosystems Engineering. 93: 4. 469-474.

13.Arnon, D.I. and Whatley, F.R. 1949. Is chloride a coenzyme of photosynthesis. Sci. 110: 2865. 554-556.

14.Sairam, R.K., Rao, K.V. and Srivastava G.C. 2002. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. J. Plant Sci. 163: 5. 1037-1046.

15.Bates, I., Waldern, R.P. and Teare, I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant. Soil. 39: 1. 205-207.

16.Hasanuzzaman, M., Hossain, M.A. and Fujita, M. 2011. Nitric oxide modulates antioxidant defense and the methylglyoxal detoxification system and reduces salinity-induced damage of wheat seedlings. Plant Biotechnol. Rep. 5: 4. 353-365.

17.Singleton, V.L. and Rossi, J.A. 1995. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic phosphotungstic acid reagents. American J. Eno. Viti. 16: 3. 144-158.

18.Zhu, J.K. 2001. Cell signaling under salt, water and cold stresses. Curr. Opin. Plant Biol. 4: 5. 401-406.

19.Ungar, I.A. 1991. Ecophysiology of vascular halophytes. CRC press. 57p.
20.El-Tayeb, M.A. 2005. Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid. Plant Grows. Reg. 45: 3. 215-224.
21.Yasir, T.A., Khan, A., Skalicky, M., Wasaya, A., Rehmani, M.I.A., Sarwar, N., Mubeen, K., Aziz, M., Hassan, M.M., Hassan, F.A. and Iqbal, M.A. 2021. Exogenous sodium nitroprusside mitigates salt stress in lentil (*Lens culinaris* medik.) by affecting the growth, yield, and biochemical properties. Mole. 26: 9. 1-13.
22.Ye, L., Zhao, X., Bao, E., Cao, K. and Zou, Z. 2019. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on watermelon growth, elemental uptake, antioxidant, and photosystem II activities and stress-response gene expressions under salinity-alkalinity stresses. Front. Plant Sci. 10: 2. 863-872.
23.Mostofa, M.G., Saegusa, D., Fujita, M. and Tran, L.S.P. 2015. Hydrogen sulfide regulates salt tolerance in rice by maintaining Na+/K+ balance, mineral homeostasis and oxidative metabolism under excessive salt stress. Front. Recent Dev. Plant Sci. 6: 3. 1055-1069.
24.Dadkhah, A. 2010. Salinity effect on germination and seedling growth of four medicinal plants. Iran. J. Medic. Arom Plants. 49: 3. 358-369. (In Persian)
25.Fathi, A., Baradaran, M. and Amerian, M. 2018. The effect of nitric oxide on seed germination and activities of some antioxidant enzymes in sesame under salt stress. Iran. J. Seed Sci. Res. 5: 3. 77-88. (In Persian)
26.Javadi, H., Seghatoleslami, M.J. and Mosavi, S. 2014. The effect of salinity on seed germination and seedling growth of four medicinal plant species. Iran. J. Fie. Cro. Res. 12: 3. 53-64. (In Persian)
27.Rezapour, R. and Abrishamchi, P. 2019. Study of sodium nitroprusside (SNP) and salt stress interaction on some traits of canola plant (*Brassica napus* L. cv. Modena). Journal of Plant Research. Iran. J. Biol. 32: 2. 341-352. (In Persian)
28.Fan, H.F., Du, C.X., Ding, L. and Xu, Y.L. 2013. Effects of nitric oxide on the germination of cucumber seeds and antioxidant enzymes under salinity stress. Acta Physiol. Plant. 35: 9. 2707-2719.
29.Asadi-Sanam, S., Mohammadi, S.M., Rameeh, V. and Gerami, M. 2018. Effect of sodium nitroprusside (SNP) on some of biochemical characteristics of purple coneflower [*Echinacea purpurea* (L.) Moench] under salinity stress. J. Plant Proc. Fun. 7: 23.123-138. (In Persian)
30.Gururani, M.A., Venkatesh, J. and Tran, L.S.P. 2015. Regulation of photosynthesis during abiotic stress-induced photoinhibition. Mole. Plant. 8: 9. 1304-1320.
31.Lei, Y., Yin, C., Ren, J. and Li, C. 2007. Effect of osmotic stress and sodium nitroprusside pretreatment on proline metabolism of wheat seedlings. Biol. Plant. 51: 2. 386-390.
32.Mohammadi, S.M., Ramaseh, W.A., Gerami, M., Asadi Sanam, S. and Khosh Rooz, M. 2018. The effect of sodium nitroprusside (SNP) on some biochemical properties of *Echinaceae purpure* (L.) Moench under salinity stress. J. Plant Proc. Fun. 33: 23. 139-124. (In Persian)
33.Boyarshinov, A.V. and Asafova, E.V. 2011. Stress responses of wheat leaves to dehydration: participation of endogenous NO and effect of sodium nitroprusside. Russ. J. Plant Physiol. 58: 6. 1034-1039.
34.Netondo, G.W., Onyango, J.C. and Beck, E. 2004. Sorghum and salinity: II. Gas exchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt stress. Crop Sci. 44: 3. 806-811.
35.Alencar, N.L., Gadelha, C.G., Gallão, M.I., Dolder, M.A., Prisco, J.T. and Gomes-Filho, E. 2015. Ultrastructural and biochemical changes induced by salt stress in Jatropha curcas seeds during germination and seedling development. Func. Plant Biol. 42: 9. 865-874.
36.Gondim, F.A., Miranda, R.D.S., Gomes-Filho, E. and Prisco, J.T. 2013. Enhanced salt tolerance in maize plants

induced by H_2O_2 leaf spraying is associated with improved gas exchange rather than with non-enzymatic antioxidant system. Theor. Exp. Plant Physiol. 25: 3. 251-260.

37. Mbarki, S., Skalicky, M., Vachova, P., Hajihashemi, S., Jouini, L., Zivcak, M., Tlustos, P., Brestic, M., Hejnak, V. and Zoghlami Khelil, A. 2020. Comparing salt tolerance at seedling and germination stages in local populations of *Medicago ciliaris* L. to *Medicago intertexta* L. and *Medicago scutellata* L. Plants. 9: 4. 526-549.
38. Kaya, C., Ak, B.E., Higgs, D. and Murillo-Amador, B. 2002. Influence of foliar-applied calcium nitrate on strawberry plants grown under salt-stressed conditions. Aust. J. Exp. Agric. 42: 5. 631-636.
39. Wang, Y., Loake, G.J. and Chu, C. 2013. Cross-talk of nitric oxide and reactive oxygen species in plant programed cell death. Front. Recent Dev. Plant Sci. 4: 2. 314-403.
40. Zhang, Y., Zhang, M. and Yang, H., 2015. Postharvest chitosan-g-salicylic acid application alleviates chilling injury and preserves cucumber fruit quality during cold storage. Food Chem. 174: 5. 558-563.
41. Fan, H., Guo, S., Jiao, Y., Zhang, R. and Li, J. 2007. Effects of exogenous nitric oxide on growth, active oxygen species metabolism, and photosynthetic characteristics in cucumber seedlings under NaCl stress. Front. Agri. Chi. 1: 3. 308-314.
42. Esim, N. and Atici, O. 2014. Nitric oxide improves chilling tolerance of maize by affecting apoplastic antioxidative enzymes in leaves. Plant Gro. Reg. 72: 1. 29-38.
43. Manai, J., Kalai, T., Gouia, H. and Corpas, F.J. 2014. Exogenous nitric oxide (NO) ameliorates salinity-induced oxidative stress in tomato (*Solanum lycopersicum*) plants. J. Soil Sci. Plant Nutri. 14: 2. 433-446.
44. Savvides, A., Ali, S., Tester, M. and Fotopoulos, V. 2016. Chemical priming of plants against multiple abiotic stresses: mission possible? Trends in plant Sci. 21: 4. 329-340.
45. Misra, N. and Saxena, P. 2009. Effect of salicylic acid on proline metabolism in lentil grown under salinity stress. Plant Sci. 177: 181-189.
46. Ahmad, P., Jaleel, C.A., Salem, M.A., Nabi, G. and Sharma, S. 2010. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. Crit. Rev. Biotech. 30: 3. 161-175.
47. Fu, J.J., Sun, Y.F., Chu, X.T., Yang, L.Y., Xu, Y.F. and Hu, T.M. 2014. Exogenous nitric oxide alleviates shade-induced oxidative stress in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.). J. Hort. Sci. Biotech. 89: 2. 193-200.
48. Yang, H., Wu, F. and Cheng, J. 2011. Reduced chilling injury in cucumber by nitric oxide and the antioxidant response. Food Chem. 127: 3. 1237-1242.
49. Wu, X.X., Zhu, X.H., Chen, J.L., Yang, S.J., Ding, H.D. and Zha, D.S. 2013. Nitric oxide alleviates adverse salt-induced effects by improving the photosynthetic performance and increasing the anti-oxidant capacity of eggplant (*Solanum melongena* L.). J. Hort. Sci. Biotech. 88: 3. 352-360.
50. Molazem, D., Qurbanov, E.M. and Dunyamaliyev, S.A. 2010. Role of proline, Na and chlorophyll content in salt tolerance of corn (*Zea mays* L.). Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 9: 3. 319-324.
51. Hasanuzzaman, M., Inafuku, M., Nahar, K., Fujita, M. and Oku, H. 2021. Nitric oxide regulates plant growth, physiology, antioxidant defense, and ion homeostasis to confer salt tolerance in the mangrove species, *Kandelia obovata*. Anti. 10: 4. 611-621.
52. Sundararajan, S., Shanmugam, R., Sivakumar, H.P. and Ramalingam, S. 2022. Exogenous supplementation with sodium nitroprusside, a nitric oxide donor, mitigates the effects of salinity in *Abelmoschus esculentus* L. seedlings. Hort. Environ. Biotechnol. 2: 3. 1-11.
53. Zheng, C., Jiang, D., Liu, F., Dai, T., Liu, W., Jing, Q. and Cao, W. 2009. Exogenous nitric oxide improves seed germination in wheat against

mitochondrial oxidative damage induced by high salinity. Environ. Exp. Bot. 67: 1. 222-227.

54.Abdel Latef, A.A.H. and Chaoxing, H. 2014. Does inoculation with *Glomus mosseae* improve salt tolerance in pepper plants? J. Plant Grow. Reg. 33: 3. 644-653.

55.Nejadalimoradi, H.A.V.V.A., Nasibi, F.A.T.E.M.E.H., Kalantari, K.M. and Zanganeh, R.O.Y.A. 2014. Effect of seed priming with L-arginine and sodium nitroprusside on some physiological parameters and antioxidant enzymes of sunflower plants exposed to salt stress. Agric. Comm. 2: 1. 23-30.

56.Kaya, C., Ashraf, M., Alyemeni, M.N. Corpas, F.J. and Ahmad, P. 2020. Salicylic acid-induced nitric oxide enhances arsenic toxicity tolerance in maize plants by upregulating the ascorbate-glutathione cycle and glyoxalase system. J. Haz. Mater. 399: 1. 1-10.

57.Alamri, S.A., Siddiqui, M.H., Al-Khaishany, M.Y., Khan, M.N., Ali, H.M. and Alakeel, K.A. 2019. Nitric oxide-mediated cross-talk of proline and heat shock proteins induce thermotolerance in *Vicia faba* L. Environ. Exp. Bot. 161: 2. 290-302.

58.Kang, H.M. and Saltveit, M.E. 2002. Antioxidant enzymes and DPPH-radical scavenging activity in chilled and heat-shocked rice (*Oryza sativa* L.) seedlings radicles. J. Agric. Food Chem. 50: 3. 513-518.

59.Tanou, G., Molassiotis, A. and Diamantidis, G. 2009. Hydrogen peroxide-and nitric oxide-induced systemic antioxidant prime-like activity under NaCl-stress and stress-free conditions in citrus plants. J. Plant Physiol. 166: 17. 1904-1913.

60.Qiao, W., Li, C. and Fan, L.M. 2014. Cross-talk between nitric oxide and hydrogen peroxide in plant responses to abiotic stresses. Environ. Exp. Bot. 100: 3. 84-93.

61.Zhang, A., Jiang, M., Zhang, J., Ding, H., Xu, S., Hu, X. and Tan, M. 2007. Nitric oxide induced by hydrogen peroxide mediates abscisic acid-induced activation of the mitogen-activated protein kinase cascade involved in antioxidant defense in maize leaves. New Phytol. 175: 1. 36-50.

62.Shi, Q., Ding, F., Wang, X. and Wei, M. 2007. Exogenous nitric oxide protects cucumber roots against oxidative stress induced by salt stress. Plant Physiol. Biochem. 45: 8. 542-550.

63.Pakkish, Z. and Tabatabaienia, M.S. 2016. The use and mechanism of NO to prevent frost damage to flower of apricot. Sci. Hort. 198: 2. 318-325.

64.Tan, J., Zhao, H., Hong, J., Han, Y., Li, H. and Zhao, W. 2008. Effects of exogenous nitric oxide on photosynthesis, antioxidant capacity and proline accumulation in wheat seedlings subjected to osmotic stress. World J. Agric. Sci. 4: 3. 307-313.