Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

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

(OPEN ACCESS)

The effect of foliar application of nutrients and melatonin on the growth characteristics and changes of elements in the roots of barley plants under conditions of waterlogging with saltwater stress

Taha Nazari[*1], Serollah Galeshi[2], Ebrahim Zeinali[3], Sergey Shabala[4]

1. Corresponding Author, Ph.D. Student of Agrotechnology-Physiology of Crop, Dept. of Agronomy, Faculty Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: khaled619nazari@gmail.com
2. Professor, Dept. of Agronomy, Faculty Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: segaleshi@gmail.com
3. Associate Prof., Dept. of Agronomy, Faculty Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: zeinalistudents@gmail.com
4. Professor, Tasmanian Institute of Agriculture, University of Tasmania, Hobart, Australia. E-mail: sergey.shabala@utas.edu.au

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 07.26.2024
Revised: 08.09.2024
Accepted: 08.20.2024

Keywords:
Ion homeostasis,
Root elements,
Root length,
Root volume,
Tillering

ABSTRACT

Background and Objectives: Experiencing both flooding and salinity stresses at the same time can cause a more significant reduction in growth and yield compared to facing each stress individually. The combination of these stresses also triggers different physiological and biochemical responses in plants. Although the physiological and molecular mechanisms of plant responses to these environmental constraints have been extensively studied, the mechanisms of plant tolerance to combined stresses are still not well understood. The present study was conducted to investigate the effects of foliar application of nutrients and melatonin on some root characteristics of four barley cultivars under combined waterlogging and saline water stress.

Materials and Methods: In order to explore the impact of foliar spraying of melatonin and nutrients on barley cultivars under conditions of waterlogging stress with salt water, a factorial experiment with 3 factors was conducted using a completely randomized design. The experiment had six replications in pots, and it was carried out in the open environment over two crop years, 1401-1400 and 1401-1402, at Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. The experimental factors included four barley varieties (Mahor, Axin, Sahra, and Fardan), waterlogging stress levels (no stress and applied stress), and foliar application of melatonin and nutrients (no foliar application, foliar spraying at the tillering stage, and foliar spraying at the elongation stage). Various parameters such as root length and volume, root and shoot dry weight, the ratio of root weight to shoot weight, iron and manganese concentration, and sodium to potassium ratio were measured.

Results: The results in four barley varieties showed that waterlogging with salt water caused a decrease of 9.4 cm in root length, 0.2 cubic cm in root volume, 0.5 g in root dry weight, and 0.4 g in dry weight. Shoots, root to shoot ratio 7.8, calcium to potassium ratio 0.01, nitrogen to potassium ratio 0.18 and increase of 8 mg/kg of iron, 11 mg/kg of manganese, and the difference in ratio Sodium to potassium reached 11. Foliar application of

nutrients and melatonin reduced the effects of stress and improved plant growth, and root length and volume increased by 14.5, 11.3, 15.3, and 16.4 cm and 2.78, 24 cm, respectively. 2.2, 4.18, and 3.43 cubic centimeters corresponding to Mahor, Axin, Sahra, and Fardan cultivars after foliar spraying at the tillering stage to 19.2, 15.7, 19.9 and 21 centimeters and 4.36, 3.73, 5.73 and 4.98 cubic centimeters improved. Also, the amounts of iron and manganese in the roots under stress conditions were 13.25, 12.75, 12.83, and 13.42 mg/kg and 17, 17.5, 18.33, and 16 mg/kg, respectively. Regarding Mahur, Axin, Sahra, and Fardan cultivars after foliar spraying in the tillering stage, iron to 7.75, 8.08, 7.92, and 7.67 mg/kg, and manganese to 11.42, 5. 12, 10.67 and 12.08 mg/kg decreased.

Conclusion: Waterlogging and salinity stress had a significant impact on the growth of roots and shoots, leading to an imbalance in ion levels. By using nutrients and melatonin in waterlogged, saline conditions, the negative effects of the stress were reduced through various mechanisms, improving growth and ion balance in both roots and above-ground parts of the plant. It is worth noting that foliar spraying was more effective during the tillering stage than the elongation stage, likely due to the longer duration of melatonin's effect, increased nutrient absorption, and tissue regeneration. Therefore, spraying melatonin and nutrients can be seen as a viable solution to minimize the damage caused by this stress in barley cultivars.

Cite this article: Nazari, Taha, Galeshi, Serollah, Zeinali, Ebrahim, Shabala, Sergey. 2025. The effect of foliar application of nutrients and melatonin on the growth characteristics and changes of elements in the roots of barley plants under conditions of waterlogging with saltwater stress. *Journal of Plant Production Research*, 32 (3), 117-133.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jopp.2024.22641.3164
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

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

اثر محلول‌پاشی عناصر غذایی و ملاتونین بر ویژگی‌های رشدی و تغییرات عناصر در ریشه گیاه جو در شرایط تنش غرقاب با آب شور

طاها نظری*[۱]، سرالله گالشی[۲]، ابراهیم زینلی[۳]، سرگی شابالا[٤]

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری اگروتکنولوژی- فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: khaled619nazari@gmail.com

۲. استاد گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: segaleshi@gmail.com

۳. دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: zeinalistudents@gmail.com

٤. استاد مؤسسه کشاورزی تاسمانی، دانشگاه تاسمانی، هوبارت، استرالیا. رایانامه: sergey.shabala@utas.edu.au

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۰۵/۰۵
تاریخ ویرایش: ۱٤۰۳/۰۵/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/۰۵/۳۰

واژه‌های کلیدی:
پنجه‌زنی،
حجم ریشه،
طول ریشه،
عناصر ریشه،
هومئوستازی یونی

چکیده

سابقه و هدف: وقوع هم‌زمان تنش‌های غرقابی و شوری می‌تواند منجر به کاهش بیش‌تر رشد و عملکرد در مقایسه با وقوع هر تنش به‌تنهایی شود. تنش‌های ترکیبی هم‌چنین طیف وسیعی از پاسخ‌های فیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی را در گیاهان القا می‌کنند. درحالی‌که سازوکارهای فیزیولوژیکی و مولکولی پاسخ‌های گیاه به هر یک از این محدودیت‌های محیطی به‌تفصیل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند اما سازوکارهای تحمل گیاه به تنش‌های ترکیبی کم‌تر شناخته‌شده است. پژوهش حاضر به‌منظور بررسی محلول‌پاشی عناصر غذایی و ملاتونین بر برخی ویژگی‌های ریشه چهار رقم جو تحت تنش ترکیبی غرقاب با آب‌شور انجام شد.

مواد و روش‌ها: باهدف بررسی اثر محلول‌پاشی ملاتونین و عناصر غذایی روی ارقام جو در شرایط تنش غرقاب با آب‌شور آزمایشی به‌صورت فاکتوریل با ۳ عامل در قالب طرح کاملاً تصادفی با شش تکرار به‌صورت گلدانی در محیط باز در دو سال زراعی ۱٤۰۱-۱٤۰۰ و ۱٤۰۱-۱٤۰۲ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان اجرا شد. عامل‌های آزمایش شامل: چهار رقم جو (ماهور، اکسین، صحرا و فردان)، تنش غرقاب با آب‌شور (دو سطح: بدون تنش و اعمال تنش)، محلول‌پاشی ملاتونین و عناصر غذایی (سه سطح: بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی در مراحل پنجه‌دهی و ساقه‌دهی) بود. در این مطالعه پارامترهای مختلفی ازجمله طول و حجم ریشه، وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی، نسبت وزن ریشه به وزن اندام هوایی، غلظت آهن و منگنز و نسبت سدیم به پتاسیم مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج در چهار رقم جو نشان داد که شرایط تنش غرقاب با آب‌شور باعث کاهش ۹/٤ سانتی‌متری طول ریشه، ۰/۲ سانتی‌مترمکعب حجم ریشه، ۰/۵ گرم وزن خشک‌ریشه، ۰/٤ گرم

وزن خشک اندام هوایی، ۷/۸ نسبت ریشه به اندام هوایی، ۰/۰۱ نسبت کلسیم به پتاسیم، ۰/۱۸ نسبت نیتروژن به پتاسیم و افزایش ۸ میلی‌گرم در کیلوگرم مقدار آهن، ۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم مقدار منگنز شد و اختلاف نسبت سدیم به پتاسیم به ۱۱ رسید. محلول‌پاشی عناصر غذایی و ملاتونین باعث کاهش اثرات تنش و بهبود رشد گیاه گردید و این‌گونه که طول و حجم ریشه به ترتیب با میانگین ۱٤/٥، ۱۱/۳، ۱٥/۳ و ۱٦/٤ سانتی‌متر و ۲/۷۸، ۲/۲٤، ٤/۱۸ و ۳/٤۳ سانتی‌مترمکعب مربوط به ارقام ماهور، اکسین، صحرا، فردان پس از محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی به ۱۹/۲، ۱٥/۷، ۱۹/۹ و ۲۱ سانتی‌متر و ٤/۳٦، ۳/۷۳، ٥/۷۳ و ٤/۹۸ سانتی‌مترمکعب بهبود یافت. هم‌چنین مقادیر آهن و منگنز ریشه در شرایط تنش به ترتیب با میانگین ۱۳/۲٥، ۱۲/۷٥، ۱۲/۸۳ و ۱۳/٤۲ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۱۷، ۱۷/٥، ۱۸/۳۳ و ۱٦ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به ارقام ماهور، اکسین، صحرا، فردان پس از محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی آهن به ۷/۷٥، ۸/۰۸، ۷/۹۲ و ۷/٦۷ میلی‌گرم در کیلوگرم و منگنز به ۱۱/٤۲، ۱۲/٥، ۱۰/٦۷ و ۱۲/۰۸ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: تنش غرقابی و شوری به‌طور قابل‌توجهی بر رشد ریشه و اندام هوایی تأثیر گذاشت و منجر به عدم تعادل در هومئوستازی یونی شد. اثر ملاتونین و در دسترس بودن مقادیر ضروری عناصر غذایی سبب کاهش اثرات منفی تنش، بهبود پارامترهای رشدی و هومئوستازی یونی در ریشه و اندام هوایی شد. هم‌چنین لازم به ذکر است که محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی بسیار مؤثرتر از مرحله ساقه‌دهی بود که احتمالاً به‌دلیل طولانی‌تر بودن زمان اثر ملاتونین، جذب بیش‌تر مواد مغذی و بازسازی بیش‌تر بافت‌ها بود. بنابراین می‌توان محلول‌پاشی ملاتونین و عناصر غذایی را به‌عنوان راهکاری مناسب برای کاهش خسارت این تنش در ارقام جو مدنظر قرارداد.

استناد: نظری، طاها، گالشی، سرالله، زینلی، ابراهیم، شابالا، سرگی (۱۴۰۴). اثر محلول‌پاشی عناصر غذایی و ملاتونین بر ویژگی‌های رشدی و تغییرات عناصر در ریشه گیاه جو در شرایط تنش غرقاب با آب شور. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۲ (۳)، ۱۳۳-۱۱۷.
DOI: 10.22069/jopp.2024.22641.3164

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

در سال‌های اخیر، تنش ترکیبی شوری- غرقابی به‌طور قابل‌توجهی در اراضی پست و ساحلی افزایش یافته است (۱). شوری خاک با رشد گیاه همبستگی منفی دارد و برخی گونه‌های گیاهی طیف وسیعی از سازوکارهای سازگاری را برای مقاومت در شرایط تنش ایجاد نموده و رشد خود را ادامه می‌دهند (۲). سیستم ریشه‌ای گیاهان اولین اندامی است که شوری را درک می‌کند، اثر اسمزی شوری مسیرهای هورمونی را به هم می‌ریزد و تقسیم سلولی اپیدرم ریشه را کاهش می‌دهد و باعث کاهش رشد ریشه اولیه و شروع توسعه جانبی ریشه می‌گردد. سطح شوری خاک به‌طورکلی ناهمگن است بنابراین، ریشه‌های جانبی می‌توانند با استخراج آب و مواد غذایی ضروری از قسمت‌های جزئی یا غیر شور به ادامه رشد گیاهان کمک کنند بااین‌حال، اگر خاک به‌طور هم‌زمان شور و غرقاب باشد، جذب مواد غذایی ضروری متوقف می‌شود (۳). در مدت‌زمان تنش غرقابی به دلیل این‌که از انتشار گاز در آب ده هزار مرتبه کاسته می‌شود، بین خاک و هوا تبادل گاز تقریباً مختل می‌شود (٤). در شرایط غرقابی، سیستم ریشه گیاه از سطح پایین اکسیژن (Hypoxia) یا حتی عدم اکسیژن (Anoxia) رنج می‌برد و حتی در گیاهان با سیستم ریشه‌ای دارای آئرانشیم (Aerenchyma) نیز حالت هیپوکسی شدید نیز مشاهده می‌شود، به‌دلیل کمبود اکسیژن، گیاهان با تخمیر به‌جای تنفس هوازی، شروع به تولید انرژی می‌کنند که از کارایی کم‌تری برخوردار است و در این بحران انرژی، جذب مواد غذایی و آب در شاخساره محدود و رشد ریشه متوقف می‌شود (۵). در پژوهشی روی دو رقم گندم (٦) نشان داده شد که عوامل مختلفی مانند مدت‌زمان تنش، مرحله رشد گیاه و نوع رقم می‌توانند تأثیر زیادی بر خسارت وارده به گیاه گندم در شرایط غرقاب داشته باشند. افزایش مدت‌زمان تنش منجر به کاهش عملکرد دانه و اجزای آن شامل تعداد سنبله در بوته، تعداد دانه در سنبله و وزن هزاردانه، زیست‌توده و شاخص برداشت شد و برخی از صفات مانند سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، تعداد دانه در سنبله و وزن هزاردانه حساسیت زیادی به تنش غرقاب نشان دادند و در کاهش عملکرد دانه نقش مهمی داشتند. هم‌چنین، آنان بیش‌ترین خسارت توسط تنش غرقاب را به سطح برگ، تعداد دانه در سنبله، وزن هزاردانه، عملکرد دانه و زیست‌توده در مرحله ساقه رفتن ربط دادند (٦). اثرات تنش‌های شوری و غرقابی به‌طور گسترده در گونه‌های مختلف گیاهی موردمطالعه قرار گرفته است، اما اثرات هم‌زمان شوری و غرقابی به‌طور کامل شناخته‌نشده است. ترکیب شوری و غرقابی اثرات نامطلوبی بر رشد و بقای بسیاری از گونه‌ها دارد (۷). کمبود اکسیژن در ناحیه ریشه، سرعت جذب سدیم را افزایش (۸) و نگهداری پتاسیم را در ریشه کاهش داده (۹) و مانع انتقال پتاسیم از ریشه به اندام هوایی می‌شود (۱۰)، درنتیجه منجر به افزایش عدم تعادل یونی و آسیب شدید برگ یا حتی مرگ گیاهان در ترکیب شوری و سطح پائین اکسیژن (Hypoxia) می‌شود. تقریباً تمام خصوصیات زراعی و فیزیولوژیکی مانند ارتفاع گیاه، وزن‌تر اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی، وزن‌تر ریشه، وزن خشک‌ریشه، سرعت رشد نسبی، زیست‌توده گیاه، محتوای کلروفیل، فتوشیمی برگ، در بسیاری از گونه‌های گیاهی تحت‌تأثیر ترکیب اثر شوری و غرقابی قرار می‌گیرند.

ملاتونین[1] یک مولکول با طیف وسیع عملکردی است که اولین بار در گیاهان در سال ۱۹۹۵ شناسایی

1- Melatonin, N-acetyl-5-methoxy-tryptamine

شد (۱۱). هم‌چنین ملاتونین در گونه‌های مختلف گیاهی و در اندام‌های مختلف مانند ریشه، ساقه، برگ، میوه‌ها و دانه‌ها یافت می‌شود و رشد و نمو، مانند اندام‌زایی ریشه، گلدهی و پیری را تنظیم می‌کند (۱۲). ملاتونین، به‌عنوان یک تنظیم‌کننده اصلی رشد گیاه عمل می‌کند و هم‌چنین پاسخ‌های گیاه به تنش را تنظیم می‌کند (۱۳). طیف وسیعی از مطالعات نشان داده‌اند که ملاتونین، به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان با طیف گسترده عملکردی، می‌تواند تحمل گیاهان را تحت تنش‌های محیطی مختلف، مانند شوری (۱٤)، سرما (۱۵)، خشکی (۱٦)، شوری (۱۷)، قلیایی (۱۸)، گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر (ROS[1]) (۱۹)، کمبود تغذیه‌ای (۲۰) و تنش فلزات سنگین (۲۱) بالا ببرد. در پژوهشی روی یونجه (۱۷) نشان داده شد که پیش تیمار ملاتونین با برنامه‌ریزی مجدد سوخت‌وساز پلی‌آمین و اتیلن، تحمل غرقابی را در یونجه بهبود می‌بخشد. در پژوهشی روی سیب نشان داده شد که کاربرد محلول‌پاشی ملاتونین باعث بهبود تنفس هوازی، محتوای کلروفیل و سرعت فتوسنتز گردید که توسط اثرات ناشی از تنش غرقابی مختل گردیده بود و با بهبود فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش غلظت گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر از گیاهان در برابر تنش غرقابی محافظت کرد (۲۲) و هم‌چنین تیمار ملاتونین توانست آسیب اکسیداتیو ناشی از غرقابی را کاهش دهد (۲۳). در مطالعه‌ای روی هلو نشان داده شد که ملاتونین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهد و غلظت گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر را در ریشه و برگ کاهش می‌دهد تا آسیب اکسیداتیو تحت تنش غرقابی را کاهش دهد (۲٤). گزارش شده است که ملاتونین به‌دلیل شباهت شیمیایی و مسیر زیست‌سنتزی مشابه با ایندول- ۳- استیک اسید (IAA[2])، عملکردهای مشابهی با اکسین در بسیاری از گونه‌های گیاهی، مانند آرابیدوپسیس[3]، گیلاس، جو، گوجه‌فرنگی، سویا، گندم و برنج، را نشان داده است (۲۵). در پژوهشی روی برنج نشان داده شد ملاتونین با تعدیل پاسخ اکسین در برنج، ساختار ریشه را تنظیم می‌کند و باعث رشد آن در شرایط مختلف تنش می‌گردد (۲٦). در پژوهشی روی گوجه‌فرنگی نشان داده شد محلول‌پاشی ملاتونین با تنظیم انتقال اکسین و انتقال سیگنال، رشد ریشه جانبی و ناخواسته را افزایش می‌دهد (۲۷). در پژوهش دیگر روی ذرت بیان شد که کاربرد خارجی ملاتونین باعث افزایش محتوای IAA درون‌زا در ذرت در شرایط نیمه‌خشک شد، بنابراین بقا و عملکرد ذرت در شرایط تنش را بهبود بخشید (۲۸). پژوهش حاضر به‌منظور بررسی محلول‌پاشی عناصر غذایی و ملاتونین بر برخی ویژگی‌های ریشه چهار رقم جو تحت تنش ترکیبی غرقاب با آب‌شور انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ٦ تکرار به‌صورت گلدانی در دو سال زراعی ۱٤۰۱-۱٤۰۰ و ۱٤۰۲-۱٤۰۱ در گلخانه روباز دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان اجرا گردید. عامل اول شامل: ٤ رقم جو (ماهور، اکسین، صحرا، فردان)، عامل دوم شامل تنش غرقاب با دو سطح بدون تنش و تنش با آب‌شور و عامل سوم شامل تیمار شاهد بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی در مراحل پنجه‌دهی و انتهای ساقه‌دهی بود. آزمایش شامل ۱٤٤ گلدان در هرسال بود. بذور سالم و هم‌اندازه و هم‌وزن هر رقم که با قارچ‌کش کاربوکسین

1- Reactive Oxygen Species

2- Indole-3-acetic acid

3- Arabidopsis

تیرام (۲ در هزار) ضدعفونی شد و در گلدان‌هایی با دهانه ۲۵ سانتی‌متر و به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر که حاوی مخلوطی از خاک زراعی با ماسه بودند، کشت شد. تاریخ کاشت گلدان‌ها ۷ و ۸ آبان ماه بود. بعد از سبز شدن تراکم مطلوب بوته با تنک کردن به حدود ۸ بوته در هر گلدان رسید. کود استفاده‌شده این‌گونه بود که ۵۰ گرم اوره، ۵۰ گرم فسفات تریپل و ۵۰ گرم کلروپتاسیم به هر گلدان اضافه شد. برای ایجاد شرایط غرقاب گلدان‌ها حوضچه‌ای به عمق ٤۰ سانتی‌متر در محل اجرای طرح حفر گردید و با آب‌شور ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر جهت اجرای تنش غرقابی با آب شور پر شد و به‌صورت مداوم میزان شوری آب با دستگاه شوری‌سنج (اندازه‌گیری هدایت الکتریکی) سنجش و با اضافه کردن نمک یا آب مقدار شوری تنظیم شد تا از عدد مشخص‌شده خارج نگردد. با توجه به هم‌زمانی مرحله پنجه‌زنی و آغاز ساقه‌دهی گیاه با شرایط وقوع غرقاب با آب شور در منطقه، تنش در انتهای مرحله پنجه‌زنی و آغاز ساقه‌دهی اعمال شد و به‌مدت ١٤ روز تداوم یافت. برای محلول‌پاشی در دو مرحله (پنجه‌زنی و ساقه‌دهی) از کود مایع TE+۲۰-۲۰-۲۰ به میزان دو در هزار (ترکیبات کود مایع به‌صورت درصد (وزن به حجم w/v) شامل: نیترون (N) ۲۰، فسفر (P_2O_5) ۲۰، پتاسیم (K_2O) ۲۰، آهن (Fe-EDTA) ۰/۱، روی (Zn-EDTA) ۰/۱، منگنز (Mn-EDTA) ۰/۰۷، مس (Cu-EDTA) ۰/۰۲، بر (B) ۰/۰۲، مولیبدن (Mo) ۰/۰۰۳، منیزیم (MgO) ۰/۵) و ملاتونین (به میزان ۱۰۰ میکرومولار) به همراه مویان (به میزان یک در هزار) برای به حداکثر رساندن جذب استفاده شد. برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری طول ریشه، حجم ریشه، وزن خشک‌ریشه و اندام‌هوایی و اندازه‌گیری عناصر ریشه ١٤ روز پس از محلول‌پاشی نمونه‌ها با خاک به‌صورت کامل از گلدان‌ها تخلیه شد و برای جداسازی ریشه نمونه‌ها از روش اشباع کردن خاک استفاده شد. حجم ریشه از طریق اندازه‌گیری حجم آب جابجا شده محاسبه شد و برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و ریشه به تفکیک پس از قرار دادن در آون به‌مدت ٤٨ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با ترازوی دقیق توزین شد. به‌منظور اندازه‌گیری عناصر ریشه گیاه شامل نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، آهن، منگنز و سدیم پس از خشک و پودر شدن نمونه‌ها، فرآیند هضم و تهیه عصاره گیاهی توسط دستگاه تجزیه عناصر ICP-MS (طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی، شرکت سازنده: Perkin Elmer (USA)، مدل دستگاه: ELAN 6100 DRC-e) انجام شد. تجزیه‌وتحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/٤ و مقایسات میانگین با آزمون LSD انجام شد.

جدول ۱- تجزیه فیزیکوشیمیایی عناصر غذایی خاک مورداستفاده در گلدان‌ها.

Table 1. Analysis of soil elements used in pots.

ارزیابی Assessment	خاک شماره ۲ Soil No.2	خاک شماره ۱ Soil No.1	واحد Unit	مؤلفه‌های مورد آزمایش Tested components
-	7.75	7.78	-	واکنش خاک Soil reaction (pH)
مناسب Appropriate	0.99	1.14	mmohs/cm	هدایت الکتریکی Electrical conductivity
مناسب Appropriate	43	42	%	درصد اشباع Saturation percentage
زیاد Plenty	28	28	%	شن Sand
مناسب Appropriate	50	50	%	سیلت Silt
کم Less	22	22	%	رس clay
مناسب Appropriate	Silt loam	Silt loam	-	بافت خاک Texture
مناسب Appropriate	8.5	8.7	%	مواد خنثی‌شونده Total Neutralizing Value
کمبود Shortage	1.0	1.2	%	کربن آلی Organic Carbon
کمبود Shortage	0.07	0.11	(%)	نیتروژن کل Total N
کمبود Shortage	8.66	10.52	PPM	فسفر قابل‌جذب P (Available Phosphorus)
کمبود Shortage	251	272	PPM	پتاسیم قابل‌جذب K (Available Potassium)
کمبود Shortage	6.23	6.25	PPM	آهن Iron
کمبود Shortage	4.88	5.12	PPM	منگنز Manganese
کمبود Shortage	0.511	0.526	PPM	روی Zinc

نتایج و بحث

براساس نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) اثرات دوگانه (تنش در محلول‌پاشی) بر پارامتر طول ریشه در سطح احتمال یک درصد (P<۰/۰۱) معنی‌دار شد و سایر پارامترها حجم ریشه، وزن خشک‌ریشه، وزن خشک اندام هوایی، نسبت ریشه به اندام هوایی، غلظت آهن، غلظت منگنز، نسبت سدیم به پتاسیم، نسبت نیتروژن به پتاسیم، نسبت کلسیم به پتاسیم در سطح احتمال پنج درصد (P<۰/۰۵) معنی‌دار شد (جدول ۲).

صفات ریخت‌شناسی: نتایج مقایسه میانگین داده‌های طول ریشه در تیمارهای محلول‌پاشی با ملاتونین و

عناصر غذایی در چهار رقم جو ماهور، اکسین، صحرا، و فردان در تیمار بدون تنش و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی به ترتیب ۲۵/٦، ۲۲/۷، ۲۸/ و ۳۱/۱ سانتی‌متر و در تیمار بدون تنش و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی به ترتیب ۲٤/۳، ۲۱/۳، ۲۷/۹ و ۲۸/۸ سانتی‌متر بود که نسبت به حالت بدون تنش افزایش داشت (جدول ۳). طول ریشه در شرایط تنش غرقابی با آب شور ارقام ماهور، اکسین، صحرا و فردان به‌ترتیب میانگین ۱٤/۵، ۱۱/۳، ۱۵/۳، ۱٦/٤ سانتی‌متر را داشتند که نسبت به حالت بدون تنش کاهش را نشان دادند. بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش طول ریشه در شرایط تنش و محلول‌پاشی در پنجه‌زنی مربوط به رقم اکسین و فردان به‌ترتیب با میانگین ۱۵/۷ و ۲۱ سانتی‌متر بود. در شرایط تنش و محلول‌پاشی در ساقه‌دهی، بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش طول ریشه مربوط به رقم اکسین و صحرا به‌ترتیب با میانگین ۱۳/٤ و ۱۷/٤ سانتی‌متر بود (جدول ۳).

بر اساس نتایج، حجم ریشه در شرایط غرقاب با آب‌شور دارای میانگین ماهور ۲/۷۸، اکسین ۲/۲٤، صحرا ٤/۱۸ و فردان ۳/٤۳ سانتی‌مترمکعب بود (جدول ۳). در شرایط بدون تنش و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی حجم ریشه میانگین ماهور ۳/٦۸، اکسین ۳/۱٦، صحرا ۵/۱۳ و فردان ٤/۳٤ سانتی‌مترمکعب را نشان داد که نسبت به حالت بدون تنش افزایش داشت. در تیمار بدون تنش و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی حجم ریشه دارای میانگین ماهور ۳/۲۲، اکسین ۲/۷۰، صحرا ٤/٦۵ و فردان ۳/۸٤ سانتی‌مترمکعب بود که نسبت به حالت بدون تنش افزایش حجم ریشه را نشان داد. ارقام اکسین و صحرا در شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی به ترتیب با میانگین ۳/۷۳ و ۵/۷۳ سانتی‌مترمکعب بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش حجم ریشه را نشان دادند. بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش حجم ریشه در شرایط تنش و محلول‌پاشی در ساقه‌دهی در ارقام اکسین و صحرا به‌ترتیب با میانگین ۳/۰۸ و ۵/۰۸ سانتی‌مترمکعب مشاهده شد (جدول ۳).

وزن خشک‌ریشه چهار رقم جو در شرایط عادی و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی میانگین ۱/۳۷ ماهور، ۱/۳۲ اکسین، ۱/٤۱ صحرا، ۱/٤۱ فردان گرم را داشت و نسبت به حالت عادی بدون محلول‌پاشی مقادیر آن بالاتر بود و در شرایط عادی و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی چهار رقم دارای میانگین ماهور ۱/۳۰، اکسین ۱/۲۵، صحرا ۱/۳٤، فردان ۱/۳٤ گرم بود که نسبت به حالت عادی بدون محلول‌پاشی افزایش داشت. تغییرات وزن خشک‌ریشه در شرایط تنش این‌گونه بود که رقم ماهور ۰/۷٤ گرم، اکسین ۰/۵۹ گرم، صحرا ۰/۷۸ گرم و فردان ۰/۸۹ گرم را به خود اختصاص دادند که نسبت به حالت عادی مقادیر آن پائین‌تر بود. بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرات وزن خشک‌ریشه در شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی به ترتیب مربوط به رقم اکسین با میانگین ۰/۸۲ گرم و رقم فردان با میانگین ۱/۱۲ گرم بود. بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرات وزن خشک‌ریشه در شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی به‌ترتیب در رقم اکسین با میانگین ۰/۷۱ گرم و رقم فردان با میانگین ۱/۰۱ گرم مشاهده شد (جدول ۳). هم‌چنین وزن خشک اندام هوایی ارقام جو در شرایط عادی و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی میانگین ماهور ۳/۷۷، اکسین ۳/۷۲، صحرا ۳/۸۱، فردان ۳/۸۱ گرم به ثبت رساندند و در شرایط عادی و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی تغییر محسوسی نسبت به حالت عادی نداشت. وزن خشک اندام هوایی چهار رقم جو با میانگین ماهور ۳/۲۵، اکسین ۳/۱۹، صحرا ۳/۲۸، فردان ۳/۲۹ گرم در شرایط تنش را نشان داد. وزن خشک اندام هوایی هر چهار رقم در شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی با

میانگین ماهور ۳/٤۸، اکسین ۳/٤۲، صحرا ۳/۵۱ و فردان ۳/۵۲ گرم که نسبت به شرایط تنش افزایش را نشان داد. هم‌چنین این صفت در شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی به‌طور میانگین در حدود ۰/٤ گرم نسبت به شرایط تنش افزایش را از خود نشان داد (جدول ۳).

نسبت وزن خشک‌ریشه به اندام هوایی در شرایط عادی و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی دارای میانگین‌های ماهور ۳٦/۳۹، اکسین ۳۵/٤۵، صحرا ۳٦/۹۷، فردان ۳۷/۰٦ بود و در شرایط عادی و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی دارای میانگین‌های ماهور ۳۵/۲۱، اکسین ۳٤/۲۳، صحرا ۳۵/۸۸، فردان ۳۵/۹۰ بود که نسبت به شرایط عادی مقادیر تیمارها بیش‌تر بودند. بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش نسبت وزن خشک‌ریشه به اندام هوایی در پاسخ به شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی به ترتیب مربوط به رقم اکسین با میانگین ۲۹/۹۰ و رقم فردان و صحرا با میانگین ۳۱/٦۹ بود. بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش نسبت وزن خشک‌ریشه به اندام هوایی در پاسخ به شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی به‌ترتیب به رقم اکسین با میانگین ۲۷/٤۰ و رقم صحرا با میانگین ۲۹/۳۱ مربوط بود (جدول ۳).

در پژوهش دی‌مدیروس و همکاران (۲۹) گزارش کردند که پارامترهای رشدی گیاه، مانند وزن خشک‌ریشه، وزن خشک اندام هوایی و ارتفاع گیاه، تحت‌تأثیر تنش غرقاب و شوری قرار گرفتند و تأثیر تنش ترکیبی شوری و غرقابی بیش‌تر از تنش شوری یا غرقابی به‌تنهایی بود، هم‌چنین تجزیه‌وتحلیل آن‌ها بیانگر یک همبستگی قوی و منفی بین تیمار تنش ترکیبی شوری و غرقابی و پارامترهای مربوط به رشد بود. در پژوهش وی و همکاران روی گیاه سویا بیان کردند که محلول‌پاشی ملاتونین در سراسر غشای پلاسمایی نفوذپذیر کرده و غلظت ملاتونین درون‌زا را افزایش می‌دهد، که رشد گیاه سویا و عملکرد دانه را افزایش می‌دهد (۳۰). در دو پژوهش ژانگ و همکاران روی خیار گزارش دادن که مصرف ملاتونین باعث تشکیل و توسعه ریشه‌های جانبی، ترجمه فاکتورها و تولید پروتئین‌های مختلف در خیار (*Cucumis sativus*) می‌شود و هم‌چنین بیان کردند ملاتونین تحمل به خشکی را بهبود بخشیده و تولید ریشه جانبی را تقویت می‌کند (۳۱). در پژوهش آرنائو و همکاران روی لوپین و چن و همکاران روی خردل چینی بیان کردند که ملاتونین رشد ریشه را تقویت می‌کند و مقاومت گیاهان به تنش رابطه مستقیمی باریشه‌های قوی دارد. به‌عنوان مثال، کاربردهای خارجی ملاتونین باعث بازسازی ریشه‌های جانبی و ریشه‌های ناخواسته در هیپولپه‌های اتیوله شده از لوپین و دانه خردل هندی (*Brassica juncea*) می‌شود (۳۲). در پژوهش ژانگ و همکاران برای بررسی اثر ملاتونین روی چند گیاه بیان کردند که در شرایط شوری، جوانه‌زنی بذر و رشد ریشه و گیاه متوقف می‌گردد و میزان خالص فتوسنتزی و محتوای کلروفیل کاهش می‌یابد، درحالی‌که پیش تیمار با ملاتونین به گیاهان اجازه داد تا ریشه‌های توقف رشد را کاهش دهند و ظرفیت فتوسنتزی را بهبود بخشند (۳۳). در پژوهش لیانگ و همکاران روی برنج در شرایط غرقاب، مصرف ملاتونین به‌طور قابل‌توجهی از توقف رشد ریشه جنینی جلوگیری کرد و افزایش حجم ریشه در برنج‌های تیمار شده مشاهده گردید (۲٦). در پژوهش لیو و همکاران روی برنج در شرایط غرقاب، تنش غرقاب آشکارا از کشیدگی ریشه اولیه جلوگیری کرد، اما این توقف رشد ریشه تا حد زیادی توسط ملاتونین در تیمارهای تحت تنش کاهش یافت و دریافتند که پیش تیمار ملاتونین به‌طور قابل‌توجهی طول ریشه جانبی مهارشده توسط تنش غرقاب را کاهش داد و باعث افزایش بیش‌تر در تراکم ریشه جانبی تحت تنش شد (۳٤).

جدول ۲- تجزیه واریانس برای صفات ریخت‌شناسی و میزان عناصر ریشه ارقام جو تحت تنش غرقابی با آب‌شور همراه با محلول‌پاشی عناصر غذایی و ملاتونین.

Table 2. Variance analysis for morphological traits and amount of root elements of barley cultivars under waterlogging stress with salt water along with foliar spraying of nutrients and melatonin.

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	وزن خشک‌ریشه Root dry weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	نسبت ریشه به اندام هوایی Root/shoot ratio	غلظت آهن Fe	غلظت منگنز Mn	نسبت سدیم به پتاسیم Na/K
سال Year	1	0.413^{ns}	0.892^{ns}	0.000^{ns}	0.000^{ns}	0.091^{ns}	10.503^{ns}	6.722^{ns}	0.253^{ns}
خطای فرعی Error A	10	5.770	0.167	0.007	0.007	2.472	2.328	7.278	0.583
رقم Cultivar	3	565.017^{*}	51.635^{*}	0.487^{*}	0.138^{*}	52.370^{ns}	0.781^{ns}	5.222^{ns}	5.483^{ns}
تنش Stress	1	5601.229^{*}	6.058^{*}	14.089^{*}	8.378^{*}	3132.691^{*}	2261.281^{*}	4512.500^{*}	3099.616^{*}
محلول‌پاشی Spraying	2	353.501^{*}	30.561^{*}	0.814^{*}	0.814^{*}	318.077^{*}	156.858^{*}	227.010^{*}	404.036^{*}
سال × رقم Year * Cultivar	3	1.573^{ns}	0.068^{ns}	0.004^{**}	0.004^{**}	1.324^{**}	1.892^{ns}	13.259^{ns}	0.490^{ns}
سال × تنش Year * Stress	1	$0.340^{n.s}$	0.000^{ns}	0.001^{ns}	0.001^{ns}	0.184^{ns}	1.253^{ns}	24.500^{**}	0.018^{ns}
سال × محلول‌پاشی Year * Spraying	2	$5.228^{n.s}$	0.199^{*}	0.006^{*}	0.006^{*}	2.400^{*}	3.462^{ns}	2.691^{ns}	0.048^{ns}
رقم × تنش Cultivar * Stress	3	30.525^{*}	0.019^{ns}	0.120^{*}	0.000^{ns}	0.492^{ns}	0.726^{ns}	7.407^{ns}	2.812^{*}
رقم × محلول‌پاشی Cultivar * Spraying	6	$1.068^{n.s}$	0.003^{ns}	0.000^{ns}	0.000^{ns}	0.051^{ns}	1.413^{ns}	3.344^{ns}	0.530^{ns}
تنش × محلول‌پاشی Stress * Spraying	2	13.085^{**}	4.441^{*}	0.051^{*}	0.051^{*}	35.932^{*}	172.781^{*}	181.135^{*}	350.464^{*}
سال × رقم × تنش Year * Cultivar * Stress	3	$0.735^{n.s}$	0.012^{ns}	0.000^{ns}	0.000^{ns}	0.012^{ns}	3.513^{ns}	7.519^{ns}	0.317^{ns}
سال × رقم × محلول‌پاشی Year * Cultivar * Spraying	6	$1.574^{n.s}$	0.003^{ns}	0.000^{ns}	0.000^{ns}	0.001^{ns}	0.878^{ns}	3.200^{ns}	0.456^{ns}
سال × تنش × محلول‌پاشی Year * Stress * Spraying	2	$0.639^{n.s}$	0.173^{*}	0.005^{**}	0.005^{**}	1.972^{*}	0.858^{ns}	1.385^{ns}	0.126^{ns}
رقم × تنش × محلول‌پاشی Cultivar * Stress * Spraying	6	$1.489^{n.s}$	0.005^{ns}	0.000^{ns}	0.000^{ns}	0.007^{ns}	2.253^{ns}	7.598^{ns}	0.507^{ns}
سال × رقم × تنش × محلول‌پاشی Year * Cultivar * Stress * Spraying	6	$1.594^{n.s}$	0.005^{ns}	0.000^{ns}	0.000^{ns}	0.001^{ns}	3.339^{ns}	2.098^{ns}	0.341^{ns}
خطای اصلی Error B	230	3.035	0.028	0.001	0.001	0.378	1.749	5.021	0.530

جدول ۳- مقایسه میانگین برای صفات ریخت‌شناسی و میزان عناصر ریشه ارقام جو تحت تنش غرقابی با آب‌شور همراه با محلول‌پاشی عناصر غذایی و ملاتونین (اندازه‌گیری برای تک‌بوته انجام گردیده است).

Table 3. Average comparison for morphological traits and amount of root elements of barley cultivars under flooding stress with salt water along with foliar spraying of nutrients and melatonin (measurement was done for a single plant).

			طول ریشه (سانتی‌متر) Root length (cm)	حجم ریشه (سانتی‌مترمکعب) Root volume (cm^3)	وزن خشک‌ریشه (گرم) Root dry weight (g)	وزن خشک اندام هوایی (گرم) Shoot dry weight (g)	نسبت ریشه به اندام هوایی Root/shoot ratio	غلظت آهن (میلی‌گرم در کیلوگرم) Fe (ppm)	غلظت منگنز (میلی‌گرم در کیلوگرم) Mn (ppm)	نسبت سدیم به پتاسیم Na/K
ماهور Mahor	بدون تنش Without stress	بدون محلول‌پاشی Without spraying	23.2^{ef}	2.98^{k}	1.24^{ab}	3.64^{b}	33.97^{bc}	4.58^{e}	6.67^{f}	1.40^{e}
		محلول‌پاشی پنجه‌زنی Tillering spraying	25.6^{d}	3.68^{h}	1.37^{a}	3.77^{a}	36.39^{a}	5.08^{de}	5.67^{f}	1.09^{e}
		محلول‌پاشی ساقه‌دهی Elongation spraying	24.3^{de}	3.22^{j}	1.30^{ab}	3.42^{c}	35.21^{b}	4.83^{e}	6.08^{f}	1.25^{e}
	تنش Stress	بدون محلول‌پاشی Without spraying	14.5^{lm}	2.78^{l}	0.74^{de}	3.25^{d}	26.13^{ef}	13.25^{a}	17.00^{ab}	12.30^{ab}
		محلول‌پاشی پنجه‌زنی Tillering spraying	19.2^{i}	4.36^{e}	0.97^{cd}	3.48^{c}	31.01^{d}	7.75^{c}	11.42^{de}	4.52^{d}
		محلول‌پاشی ساقه‌دهی Elongation spraying	16.6^{jk}	3.68^{h}	0.86^{d}	3.36^{cd}	28.58^{e}	10.83^{b}	12.08^{cde}	6.47^{c}
اکسین Oxin	بدون تنش Without stress	بدون محلول‌پاشی Without spraying	19.9^{hi}	2.44^{m}	1.18^{b}	3.58^{b}	32.95^{c}	5.08^{de}	6.50^{f}	1.38^{e}
		محلول‌پاشی پنجه‌زنی Tillering spraying	22.7^{f}	3.16^{j}	1.32^{ab}	3.72^{ab}	35.45^{ab}	4.58^{e}	5.83^{f}	1.08^{e}
		محلول‌پاشی ساقه‌دهی Elongation spraying	21.3^{g}	2.70^{l}	1.25^{ab}	3.65^{b}	34.23^{bc}	4.83^{e}	5.67^{f}	1.27^{e}
	تنش Stress	بدون محلول‌پاشی Without spraying	11.3^{n}	2.24^{n}	0.59^{e}	3.19^{d}	24.86^{f}	12.75^{a}	17.50^{ab}	13.07^{a}
		محلول‌پاشی پنجه‌زنی Tillering spraying	15.7^{kl}	3.73^{gh}	0.82^{d}	3.42^{c}	29.90^{de}	8.08^{c}	12.58^{cd}	4.78^{d}
		محلول‌پاشی ساقه‌دهی Elongation spraying	13.4^{m}	3.08^{jk}	0.71^{de}	3.31^{cd}	27.40^{e}	11.00^{b}	13.33^{c}	6.95^{c}
صحرا Sahra	بدون تنش Without stress	بدون محلول‌پاشی Without spraying	25.4^{d}	4.38^{e}	1.27^{ab}	3.67^{b}	34.59^{bc}	5.08^{de}	5.08^{f}	1.18^{e}
		محلول‌پاشی پنجه‌زنی Tillering spraying	28.6^{b}	5.13^{b}	1.41^{a}	3.81^{a}	36.97^{a}	4.92^{de}	5.75^{f}	0.90^{e}
		محلول‌پاشی ساقه‌دهی Elongation spraying	27.9^{bc}	4.65^{d}	1.34^{ab}	3.74^{a}	35.81^{ab}	5.42^{de}	5.42^{f}	1.08^{e}
	تنش Stress	بدون محلول‌پاشی Without spraying	15.3^{kl}	4.18^{f}	0.78^{de}	3.28^{d}	26.92^{e}	12.83^{a}	18.33^{a}	11.16^{b}
		محلول‌پاشی پنجه‌زنی Tillering spraying	19.9^{hi}	5.73^{a}	1.01^{cd}	3.51^{c}	31.69^{d}	7.92^{c}	10.67^{e}	4.24^{d}
		محلول‌پاشی ساقه‌دهی Elongation spraying	17.4^{j}	5.08^{bc}	0.90^{d}	3.40^{cd}	29.31^{de}	11.00^{b}	12.67^{cd}	5.72^{cd}
فردان Fardan	بدون تنش Without stress	بدون محلول‌پاشی Without spraying	26.9^{c}	3.62^{h}	1.28^{ab}	3.68^{b}	34.69^{bc}	5.33^{de}	6.58^{f}	1.33^{e}
		محلول‌پاشی پنجه‌زنی Tillering spraying	31.1^{a}	4.34^{e}	1.41^{a}	3.81^{a}	37.06^{a}	5.92^{d}	6.58^{f}	1.01^{e}
		محلول‌پاشی ساقه‌دهی Elongation spraying	28.8^{b}	3.84^{g}	1.34^{ab}	3.74^{a}	35.90^{ab}	4.42^{e}	6.17^{f}	1.18^{e}
	تنش Stress	بدون محلول‌پاشی Without spraying	16.4^{jk}	3.43^{i}	0.89^{d}	3.29^{d}	27.03^{e}	13.42^{a}	16.00^{b}	12.16^{ab}
		محلول‌پاشی پنجه‌زنی Tillering spraying	21.0^{gh}	4.98^{c}	1.12^{c}	3.52^{c}	31.79^{d}	7.67^{c}	12.08^{cde}	4.62^{d}
		محلول‌پاشی ساقه‌دهی Elongation spraying	18.9^{i}	4.33^{e}	1.00^{cd}	3.40^{cd}	29.42^{de}	10.83^{b}	13.33^{c}	6.65^{c}

بررسی میزان عناصر: مقدار آهن ریشه جو در حالت عادی و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی این‌گونه بود که ماهور میانگین ۵/۰۸، فردان با میانگین ۵/۹۲، اکسین با میانگین ٤/٥٨ و صحرا با میانگین ٤/٩٢ میلی‌گرم در کیلوگرم به ثبت رساندند که نسبت به حالت عادی مقادیر کم‌تری را نشان داد. مقدار آهن ریشه در حالت عادی و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی دو رقم ماهور و صحرا با میانگین ٤/٨٣ و ٥/٤٢ و رقم اکسین و فردان با میانگین ٤/٨٣ و ٤/٤٢ میلی‌گرم در کیلوگرم را داشتند. در شرایط تنش، مقدار آهن در ریشه این‌گونه بود که رقم ماهور با میانگین ١٣/٢٥ میلی‌گرم در کیلوگرم، اکسین با میانگین ١٢/٧٥ میلی‌گرم در کیلوگرم، صحرا با میانگین ١٢/٨٣ میلی‌گرم در کیلوگرم و فردان ١٣/٤٢ میلی‌گرم در کیلوگرم را نشان دادند و نسبت به حالت عادی مقادیر افزایش دو برابری داشت. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار آهن ریشه در شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی به ترتیب مربوط به رقم فردان با میانگین ٧/٦٧ میلی‌گرم در کیلوگرم و رقم اکسین با میانگین ٨/٠٨ میلی‌گرم در کیلوگرم بود و مقدار آهن ریشه در شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی رقم ماهور ١٠/٨٣، اکسین ١١، صحرا ١١، فردان ١٠/٨٢ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ٣).

مقدار منگنز ریشه ارقام جو در حالت عادی و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی نسبت به شرایط عادی اختلاف معنی‌داری نداشتند. مقدار منگنز ریشه در شرایط تنش ارقام میانگین ماهور ١٧، اکسین ١٧/٥، صحرا ١٨/٣٢، فردان ١٦ میلی‌گرم در کیلوگرم را به خود اختصاص دادند که نسبت به حالت عادی مقادیر منگنز بیش‌تری داشتند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار منگنز ریشه در شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی به‌ترتیب مربوط رقم اکسین با میانگین ١٢/٥ و رقم صحرا با میانگین ١٠/٦٧ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار منگنز ریشه شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی به ترتیب مربوط به رقم ماهور با ١٢/٠٨ و رقم اکسین با ١٣/٣٣ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ٣).

بر اساس نتایج نسبت نیتروژن به پتاسیم ریشه در ارقام جو در شرایط عادی و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی نسبت به حالت عادی تغییرات معنی‌داری نداشت. در شرایط تنش نسبت نیتروژن به پتاسیم ریشه در ارقام این‌گونه بود که ماهور ٢/٦٩، اکسین ٢/٩٢، صحرا ٢/٨٤، فردان ٢/٨٤ را نشان دادند و نسبت به حالت عادی مقادیر کم‌تری را نشان دادند. نسبت نیتروژن به پتاسیم ریشه در پاسخ به شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی در چهار رقم اینگونه بود که ماهور ١/٩٣، اکسین ٢/٠٧، صحرا ٢/٠٦، فردان ١/٩٩ را نشان دادند که نسبت به شرایط تنش مقادیر کم‌تری داشتند. این نسبت در شرایط تنش و محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی نسبت به حالت تنش در رقم ماهور ٢٠ درصد، اکسین ٢٨ درصد، صحرا ٢٧ درصد و فردان ٢٨ درصد کاهش را نشان دادند (جدول ٣).

در پژوهش دوان و همکاران روی گیاه کوشیا نشان دادند که اثرات ترکیبی تنش شوری و غرقاب مانع رشد گیاهچه می‌شود علاوه‌بر این، توقف رشد ممکن است ناشی از اثرات منفی افزایش غلظت Na^+، Cl^- و هم‌چنین کاهش غلظت پتاسیم باشد (٣٥). هومئوستازی یا تعادل یونی پتاسیم و سدیم درون‌سلولی یک عامل کلیدی تعیین‌کننده تحمل به شوری گیاه است (٣٤). بازیگران کلیدی در این فرآیند، ضدپورت‌های غشای پلاسمایی SOS1 Na^+/H^+ هستند که به‌طور فعال سدیم را از سیتوزول خارج می‌کنند و کانال‌های تصحیح بیرونی فعال‌شده با دپلاریزاسیون، مسئول حفظ پتاسیم در سیتوزول هستند و عملکرد هردوی

این انتقال‌دهنده‌ها به‌شدت به در دسترس بودن اکسیژن بستگی دارد. معمولاً، گرادیان‌های پروتون (H^+) در سراسر غشای پلاسمایی سلول‌های قشر مغز ریشه باعث تنظیم غلظت Na^+ و Cl^- در مکان‌های بارگذاری آوند چوبی در ریشه‌ها تا حد قابل‌توجهی هستند (۳۶). فعالیت H^+-ATPase این گرادیان‌های H^+ را حفظ می‌کند، که احتمالاً توسط کمبود ATP ناشی از غرقابی آسیب می‌بیند و پمپ H^+ هم‌چنین عامل اصلی الکتروژنیک ضروری برای حفظ یک مقدار پتانسیل منفی غشا است، بنابراین کانال K^+ GORK (کانال پتاسیم اصلاح‌کننده دردار به بیرون) را بسته نگه می‌دارد (۳۶). در پژوهش محمدنژاد و همکاران روی گندم در مورد غلظت پتاسیم و سدیم بیان کردند بین ژنوتیپ‌های گندم ازنظر جذب سدیم و پتاسیم اختلاف وجود دارد و با بالا رفتن شوری اختلاف ارقام در نسبت سدیم و پتاسیم بیش‌تر می‌گردد و ارقام متحمل‌تر، نسبت کمتر و رشد بیش‌تری دارند (۳۷).

با کاهش پتانسیل ردوکس خاک در شرایط غرقابی، دی‌اکسید منگنز (Mn^{4+}) و هیدروکسیدهای آهن نامحلول (Fe^{3+}) به یون‌های محلول منگنز (Mn^{2+}) و آهن (Fe^{2+}) کاهش می‌یابند و باتوجه اهمیت منگنز و آهن به‌عنوان یک ریزمغذی ضروری، اما منگنز اضافی به دستگاه فتوسنتزی آسیب می‌رساند، با جذب سایر مواد مغذی تداخل ایجاد می‌کند و ممکن است باعث تنش اکسیداتیو شود که منجر به کلروز و نکروز در برگ‌ها و متعاقباً مرگ گیاهان کامل می‌شود (۳۸). علائم بصری سمیت منگنز مانند کلروز و نکروز در برگ‌های جو رشد یافته به روش هیدروپونیک در غلظت‌های کم‌تر از ۵۰ میکرومولار (یعنی <۵ ppm) مشاهده شد و در آزمایش‌های مزرعه‌ای، آستانه سمی برای غلات رشد شده در خاک‌های زهکشی شده حدود ۱۰ ppm منگنز گزارش شد (۳۹). در پژوهش زنگ و همکاران روی گیاه جو در شرایط تنش غرقاب و شوری بیان کردند که افزایش قابل‌توجهی در هر دو مقدار منگنز و آهن در محلول خاک برای محیط لوم شنی مشاهده شد. در این پژوهش، محتوای منگنز در محلول خاک لومی شنی تا روز ۱۴ برای تیمار غرقابی به‌تنهایی از آستانه دوم (سمیت) فراتر رفت و در حدود روز ۳ در تیمار ترکیبی شوری و غرقابی نزدیک به آستانه دوم بود. هم‌چنین بیان کردند که منگنز پیامدهای عمده‌ای برای حفظ پتاسیم در ریشه جو در ۲۴ ساعت پس از قرار گرفتن در معرض تنش داشت و درنتیجه، افزایش چشمگیر غلظت منگنز که در لوم شنی (تا ۲۰ ppm) در شرایط غرقابی مشاهده شد، که خطر بالای سمیت منگنز را برای گیاهان جو ایجاد می‌کند (۴۰). ملاتونین فعالیت‌های کانال اصلاح‌کننده AKT1 و ضدپورتر Na^+/H^+ (واقع در تونوپلاست) را تغییر می‌دهد تا نرخ جذب نسبی سدیم و پتاسیم را کنترل کند و یون‌ها را به داخل واکوئل‌ها تقسیم کند، که باعث کاهش سطح یون در سیتوپلاسم و هومئوستازی یونی بازسازی می‌شود (۷).

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج حاصل نشان داد کم‌ترین مقادیر طول ریشه، حجم ریشه، وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی در شرایط تنش غرقاب با آب‌شور به‌دست آمد و هم‌چنین تنش باعث افزایش شدید مقادیر آهن و منگنز و نسبت سدیم به پتاسیم شد. محلول‌پاشی عناصر غذایی و ملاتونین در تنش غرقابی با آب شور در مرحله پنجه‌زنی و ساقه‌دهی باعث بهبود طول، حجم، وزن خشک‌ریشه و وزن خشک اندام‌هوایی شد و هم‌چنین موجب کاهش مقادیر آهن، منگنز و نسبت سدیم به کلسیم شد. اثر ملاتونین و در دسترس بودن مقادیر ضروری عناصر غذایی سبب کاهش اثرات منفی تنش، بهبود پارامترهای رشدی و هومئوستازی یونی در

ریشه و اندام هوایی شد. هم‌چنین باید بیان کرد که محلول‌پاشی عناصر غذایی و ملاتونین در مرحله پنجه‌زنی بسیار تأثیرگذارتر از محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی است به‌طوری‌که در تمامی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده دارای میانگین بالاتر نسبت به محلول‌پاشی در مرحله ساقه‌دهی بود که می‌توان دلیل آن را نیز داشتن زمان بیش‌تر اثرگذاری ملاتونین، جذب بالاتر عناصر غذایی و بازسازی دانست. در بین ارقام مورد آزمایش رقم فردان میانگین‌های بهتری را نسبت به سایر ارقام نشان داد، هم‌چنین رقم اکسین نشان داد که حساسیت بیش‌تری به تنش غرقابی با آب‌شور دارد و کم‌ترین میانگین‌ها را به خود اختصاص داد. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود برای ترویج استفاده از ملاتونین در تحمل بیش‌تر به تنش‌های ترکیبی همانند غرقاب و شوری پژوهش‌های تکمیلی و کاربردی در مزارع طراحی و اجرا گردد، تا افزایش ظرفیت سازگاری با چالش‌های زیست‌محیطی در آینده را بهبود داد.

سپاسگزاری

مایلیم از اساتید و کارشناسان گروه زراعت و کارکنان فنی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان برای حمایت و کمک آن‌ها در انجام این پژوهش قدردانی کنیم.

منابع

1. Chen, L., Li, C., Feng, Q., Wei, Y., Zheng, H., Zhao, Y., & Li, H. (2017). Shifts in soil microbial metabolic activities and community structures along a salinity gradient of irrigation water in a typical arid region of China. *Science of the Total Environment*, 598, 64-70.
2. Munns, R., & Gilliham, M. (2015). Salinity tolerance of crops–what is the cost?. *New phytologist*, 208(3), 668-673.
3. Waidmann, S., Sarkel, E., & Kleine-Vehn, J. (2020). Same same, but different: growth responses of primary and lateral roots. *Journal of Experimental Botany*, 71(8), 2397-2411.
4. Galeshi, S., Modares Sanavi, A., & Tahmasbi, Z. (2000). Influence of flooding stress on nitrogen growth and stabilization in Groundwater Clover (Trifolium subterraneum). *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 7(4), 107-112. [In Persian with English summary]
5. Herzog, M., Striker, G. G., Colmer, T. D., & Pedersen, O. (2016). Mechanisms of waterlogging tolerance in wheat–a review of root and shoot physiology. *Plant, cell & environment*, 39(5), 1068-1086.
6. Shahkoomahali, H., Galeshi, S., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Effects of flooding stress in two tillering and stem elongation stages on grain yield and its components in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Production*, 13(2), 1-16.
7. Barrett-Lennard, E. G., & Shabala, S. N. (2013). The waterlogging/salinity interaction in higher plants revisited–focusing on the hypoxia-induced disturbance to K+ homeostasis. *Functional Plant Biology*, 40(9), 872-882.
8. Li, Y., Zhang, Y., Feng, F., Liang, D., Cheng, L., Ma, F., & Shi, S. (2010). Overexpression of a Malus vacuolar Na+/H+ antiporter gene (MdNHX1) in apple rootstock M. 26 and its influence on salt tolerance. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 102, 337-345.
9. Wu, Q., Su, N., Huang, X., Cui, J., Shabala, L., Zhou, M., Yu, M., & Shabala, S. (2021). Hypoxia-induced increase in GABA content is essential for restoration of membrane potential and preventing ROS-induced disturbance to ion homeostasis. *Plant Communications*, 2(3).

10. Colmer, T. D., & Greenway, H. (2011). Ion transport in seminal and adventitious roots of cereals during O_2 deficiency. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 39-57.
11. Dubbels, R., Reiter, R. J., Klenke, E., Goebel, A., Schnakenberg, E., Ehlers, C., & Schloot, W. (1995). Melatonin in edible plants identified by radioimmunoassay and by high performance liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of pineal research*, 18(1), 28-31.
12. Wang, L., Feng, C., Zheng, X., Guo, Y., Zhou, F., Shan, D., & Kong, J. (2017). Plant mitochondria synthesize melatonin and enhance the tolerance of plants to drought stress. *Journal of pineal research*, 63(3), e12429.
13. Sun, C., Liu, L., Wang, L., Li, B., Jin, C., & Lin, X. (2021). Melatonin: A master regulator of plant development and stress responses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(1), 126-145.
14. Li, C., Wang, P., Wei, Z., Liang, D., Liu, C., Yin, L., & Ma, F. (2012). The mitigation effects of exogenous melatonin on salinity-induced stress in Malus hupehensis. *Journal of pineal research*, 53(3), 298-306.
15. Wang, M., Zhang, S., & Ding, F. (2020). Melatonin mitigates chilling-induced oxidative stress and photosynthesis inhibition in tomato plants. *Antioxidants*, 9(3), 218.
16. Gul, N., Haq, Z. U., Ali, H., Munsif, F., Hassan, S. S. U., & Bungau, S. (2022). Melatonin pretreatment alleviated inhibitory effects of drought stress by enhancing anti-oxidant activities and accumulation of higher proline and plant pigments and improving maize productivity. *Agronomy*, 12(10), 2398.
17. Zhang, Q., Liu, X., Zhang, Z., Liu, N., Li, D., & Hu, L. (2019). Melatonin improved waterlogging tolerance in alfalfa (*Medicago sativa*) by reprogramming polyamine and ethylene metabolism. *Frontiers in plant science*, 10, 44.
18. Lu, X., Min, W., Shi, Y., Tian, L., Li, P., Ma, T., & Luo, C. (2022). Exogenous melatonin alleviates alkaline stress by removing reactive oxygen species and promoting antioxidant defence in rice seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 13, 849553.
19. Martinez, V., Nieves-Cordones, M., Lopez-Delacalle, M., Rodenas, R., Mestre, T. C., Garcia-Sanchez, F., & Rivero, R. M. (2018). Tolerance to stress combination in tomato plants: new insights in the protective role of melatonin. *Molecules*, 23(3), 535.
20. Kobylińska, A., Borek, S., & Posmyk, M. M. (2018). Melatonin redirects carbohydrates metabolism during sugar starvation in plant cells. *Journal of Pineal Research*, 64(4), e12466.
21. Sun, C., Lv, T., Huang, L., Liu, X., Jin, C., & Lin, X. (2020). Melatonin ameliorates aluminum toxicity through enhancing aluminum exclusion and reestablishing redox homeostasis in roots of wheat. *Journal of Pineal Research*, 68(4), e12642.
22. Zheng, X., Zhou, J., Tan, D. X., Wang, N., Wang, L., Shan, D., & Kong, J. (2017). Melatonin improves waterlogging tolerance of *Malus baccata* (Linn.) Borkh. seedlings by maintaining aerobic respiration, photosynthesis and ROS migration. *Frontiers in plant science*, 8, 483.
23. Zeng, W., Mostafa, S., Lu, Z., & Jin, B. (2022). Melatonin-mediated abiotic stress tolerance in plants. *Frontiers in plant science*, 13, 847175.
24. Gu, X., Xue, L., Lu, L., Xiao, J., Song, G., Xie, M., & Zhang, H. (2021). Melatonin enhances the waterlogging tolerance of Prunus persica by modulating antioxidant metabolism and anaerobic respiration. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 2178-2190.
25. Wei, W., Li, Q. T., Chu, Y. N., Reiter, R. J., Yu, X. M., Zhu, D. H., & Chen, S. Y. (2015). Melatonin enhances plant growth and abiotic stress tolerance in soybean plants. *Journal of experimental botany*, 66(3), 695-707.

26. Liang, C., Li, A., Yu, H., Li, W., Liang, C., Guo, S., & Chu, C. (2017). Melatonin regulates root architecture by modulating auxin response in rice. *Frontiers in Plant Science*, 8, 134.
27. Wen, D., Gong, B., Sun, S., Liu, S., Wang, X., Wei, M., & Shi, Q. (2016). Promoting roles of melatonin in adventitious root development of *Solanum lycopersicum* L. by regulating auxin and nitric oxide signaling. *Frontiers in plant science*, 7, 718.
28. Ahmad, S., Kamran, M., Zhou, X., Ahmad, I., Meng, X., Javed, T., & Han, Q. (2021). Melatonin improves the seed filling rate and endogenous hormonal mechanism in grains of summer maize. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 1059-1072.
29. de Medeiros, W. J. F., de Oliveira, F. Í. F., de Lacerda, C. F., de Sousa, C. H. C., Cavalcante, L. F., da Silva, A. R. A., & da Silva Ferreira, J. F. (2018). Isolated and combined effects of soil salinity and waterlogging in seedlings of'Green Dwarf'coconut. *Semina: Ciências Agrárias*, 39(4), 1459-1468.
30. Chen, J., Li, H., Yang, K., Wang, Y., Yang, L., Hu, L., & Shi, Z. (2019). Melatonin facilitates lateral root development by coordinating PAO-derived hydrogen peroxide and Rboh-derived superoxide radical. *Free Radical Biology and Medicine*, 143, 534-544.
31. Zhang, N., Sun, Q., Zhang, H., Cao, Y., Weeda, S., Ren, S., & Guo, Y. D. (2015). Roles of melatonin in abiotic stress resistance in plants. *Journal of experimental botany*, 66(3), 647-656.
32. Zhang, N., Zhao, B., Zhang, H. J., Weeda, S., Yang, C., Yang, Z. C., & Guo, Y. D. (2013). Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of pineal research*, 54(1), 15-23.
33. Chen, Q., Qi, W. B., Reiter, R. J., Wei, W., & Wang, B. M. (2009). Exogenously applied melatonin stimulates root growth and raises endogenous indoleacetic acid in roots of etiolated seedlings of Brassica juncea. *Journal of plant physiology*, 166(3), 324-328.
34. Liu, J., Wang, J., Zhang, T., Li, M., Yan, H., Liu, Q., & Zhao, Q. (2023). Exogenous melatonin positively regulates rice root growth through promoting the antioxidant system and mediating the auxin signaling under root-zone hypoxia stress. *Agronomy*, 13(2), 386.
35. Duan, H., Ma, Y., Liu, R., Li, Q., Yang, Y., & Song, J. (2018). Effect of combined waterlogging and salinity stresses on euhalophyte Suaeda glauca. *Plant Physiology and Biochemistry*, 127, 231-237.
36. Tahjib-Ul-Arif, M., Hasan, M. T., Rahman, M. A., Nuruzzaman, M., Rahman, A. S., Hasanuzzaman, M., & Brestic, M. (2023). Plant response to combined salinity and waterlogging stress: Current research progress and future prospects. *Plant Stress*, 7, 100137.
37. Mohamadnezhad, Y., & Galeshi, S. (2019). Effects of salinity and drought on growth, water use efficiency and sodium and potassium concentrations of two irrigated and rain-fed spring wheat genotypes. *Journal of Crop Production*, 12(1), 23-46.
38. Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A. G., Mora, M. L., & Alberdi, M. (2010). Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of soil science and plant nutrition*, 10(4), 470-481.
39. Führs, H., Behrens, C., Gallien, S., Heintz, D., Van Dorsselaer, A., Braun, H. P., & Horst, W. J. (2010). Physiological and proteomic characterization of manganese sensitivity and tolerance in rice (*Oryza sativa*) in comparison with barley (*Hordeum vulgare*). *Annals of Botany*, 105(7), 1129-1140.
40. Zeng, F., Shabala, L., Zhou, M., Zhang, G., & Shabala, S. (2013). Barley responses to combined waterlogging and salinity stress: separating effects of oxygen deprivation and elemental toxicity. *Frontiers in Plant Science*, 4, 313.