

تأثیر غلظت‌های مختلف آهن بر رشد و جذب عناصر توسط گیاه کتان روغنی (*Linum usitatissimum* L.) تحت تنش شوری

صغری محمدی^۱، احمد مهتدی^{۲*} و محسن موحدی دهنوی^۳

^۱ گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه یاسوج

^۳ گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۸، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۴/۳۰)

چکیده

گیاهان برای رشد بهینه در شرایط تنش، به مقادیر مناسبی از ریزمغذی‌ها نیاز دارند که می‌توانند مقاومت گیاه را در شرایط تنش، مانند شوری، افزایش دهند. به منظور بررسی واکنش گیاه کتان روغنی نسبت به کاربرد آهن در شرایط تنش شوری، آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. شوری با کلرید سدیم در پنج سطح (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار) و آهن با سه سطح (۲۵، ۵۰ و ۷۵ میکرومولار) انتخاب شدند. با افزایش میزان شوری، میزان سدیم ریشه و اندام هوایی افزایش و میزان پتاسیم ریشه و اندام هوایی کاهش نشان داد. غلظت آهن ریشه با افزایش شوری تا سطح ۱۰۰ میلی‌مولار افزایش و سپس کاهش پیدا کرد. غلظت آهن اندام هوایی تا سطح ۵۰ میلی‌مولار شوری افزایش و سپس روند کاهشی را نشان داد. با افزایش شوری میزان پرولین و قند محلول برگ افزایش پیدا کرد. در همه سطوح شوری، آهن اثر معنی‌داری بر میزان پرولین و قند محلول داشت. با افزایش شوری تا سطح ۵۰ میلی‌مولار، پروتئین محلول برگ، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت (پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز) افزایش و سپس روند کاهشی نشان داد. با افزایش شوری وزن خشک ریشه و اندام هوایی کاهش یافت. برای تخفیف اثر شوری استفاده از آهن ۵۰ و ۷۵ میکرومولار در محلول‌های غذایی پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: پتاسیم، پرولین، سدیم، قند محلول

مقدمه

که در مناطق خشک و گرم تا معتدله رشد و نمو می‌کند (امید بیگی، ۱۳۷۹). کتان روغنی به همراه گندم و جو از قدیمی‌ترین گیاهان جهان است که به طور وحشی در آسیای غربی رشد کرده و بومی ایران می‌باشد (موحدی‌دهنوی و همکاران، ۱۳۸۹).

شوری خاک یک نگرانی عمده برای کشاورزی جهان در طول تاریخ بشر بوده است. در سال‌های اخیر، این مشکل به

یکی از نیازهای اساسی روند رشد جمعیت، در زمینه تأمین روغن‌های گیاهی از دانه‌های روغنی است که تولیدات آنها به مصارف مختلف صنعتی، خوراکی و آرایشی می‌رسد. یکی از گیاهان روغنی که در سطح جهان از اهمیت خاصی برخوردار است، کتان روغنی می‌باشد (پرهیزگارخاجانی و همکاران، ۱۳۹۱). کتان روغنی گیاهی یک ساله از خانواده لیناسه می‌باشد

*نویسنده مسؤول، نشانی پست الکترونیکی: a.mohtadi@yu.ac.ir

طور جدی و پیوسته در بسیاری از نقاط جهان افزایش یافته، که بیشتر در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. خاک‌های شور حدود ۷ درصد سطح زمین را اشغال کرده‌اند. هم‌چنین ۲۳ درصد از زمین‌های زراعی دنیا شورند و ۲۰ درصد از زمین‌های تحت آبیاری از شوری ثانویه رنج می‌برند (رجایی و دستفال، ۱۳۹۶). در خاک‌های شور سدیمی حلالیت عناصر کم مصرف (نظیر آهن، منگنز، مس، روی و مولیبدن) کم بوده و گیاهانی که در این خاک‌ها رشد می‌کنند، اغلب از نظر این عناصر دچار کمبود می‌باشند. به این دلیل روابط بین شوری و تغذیه عناصر کم‌مصرف پیچیده است. زیرا شوری ممکن است موجب کاهش یا افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف در اندام‌های هوایی گیاه شود، یا اینکه تأثیری بر غلظت این عناصر نداشته باشد (عمادی و همکاران، ۱۳۹۳). شوری به دلیل وجود غلظت‌های بالایی از یون‌هایی مانند سدیم و کلر، سمیت یونی تولید می‌کند که موجب از هم پاشیدگی ساختار غشاء، مهار تقسیم و رشد سلول می‌شود و در طیف وسیعی از متابولیسم‌های سلولی شامل فتوسنتز، سنتز پروتئین و متابولیسم لیپید اختلال ایجاد می‌کند (Zhani et al., 2012). در هنگام تنش شوری میزان سدیم ریشه افزایش می‌یابد که بسته به گونه گیاهی، گیاه برای رهایی از سمیت، سعی در خروج و یا فرستادن آن به واکوئل‌ها می‌کند (آذری و همکاران، ۱۳۹۱). طبق بررسی منابع صورت گرفته، در شرایط شوری یون Na^+ با سایر یون‌های غذایی به خصوص K^+ رقابت کرده و جذب پتاسیم را کاهش می‌دهد (Parida and Das, 2005). مطالعات انجام شده نشان دادند شوری ناشی از کلرید سدیم موجب کمبود آهن در گیاه می‌شود، که این کمبود سبب تغییر در ویژگی‌های سلول‌های اپیدرمی ریشه آترپلیکس شد (میرزاپور و خوش گفتارمنش، ۱۳۸۷).

شوری در شرایط کمبود آهن سبب افزایش تنظیم کننده‌های اسمزی، کربوهیدرات و پرولین می‌گردد. پرولین یک شاخص مهم در پاسخ به تحمل طیف وسیعی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی است (Ozturk et al., 2012). تجمع قندهای محلول در شرایط تنش سبب تنظیم اسمزی و کاهش

از دست دادن آب سلول و حفظ آماس می‌شود (Kumar et al., 2007). کاربرد آهن در سطوح مختلف شوری باعث کاهش میزان MDA، افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز شده است (Sinha and Saxena, 2006). بالا رفتن میزان فعالیت آنزیم‌ها تحت تنش شوری در کنار تنظیم اسمزی می‌تواند بر مقدار مقاومت در گیاهان بیفزاید. علت این که همه آنزیم‌ها آنتی‌اکسیدان در طی اعمال شوری افزایش پیدا نمی‌کند، بستگی به گونه گیاهی، مرحله رشد، غلظت و نوع نمک دارد (حیدری و مصری، ۱۳۸۹).

عناصر غذایی کم‌مصرف بسیار لازم و اساسی برای رشد و نمو گیاهان هستند. آهن عنصری غیر متحرک است و کمبود آن در برگ‌های جوان دیده می‌شود (وزیری کته‌شوری و همکاران، ۱۳۹۲). آهن با شرکت در متابولیسم کربوهیدرات‌ها مانند نیتروژن به افزایش قندهای محلول در گیاه در شرایط تنش کمک می‌کند (کیانی‌چالمردی و عبدل‌زاده، ۱۳۹۱). شوری موجب ممانعت از سنتز پروتئین‌ها در گیاه می‌شود و در نتیجه مقدار پروتئین‌های موجود در گیاه در پاسخ به شوری کاهش می‌یابد (Parida and Das, 2005). گیاهان دارویی برای تولید مواد مؤثره به مقادیر مناسبی از ریزمغذی‌ها نیاز دارند و در بین ریز مغذی‌ها بیشترین نیاز را به آهن دارند (سپهری و وزیری امجد، ۱۳۹۴). در آزمایشی محلول پاشی عناصر آهن، منگنز و روی موجب بهبود رشد گندم تحت تنش شوری گردید (EL-Fouly et al., 2011). مطالعات انجام شده توسط Tunçturk و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که اثر شوری بر غلظت آهن ریشه کلزا بسته به نوع رقم آن متفاوت بود؛ به طوریکه غلظت آهن ریشه در برخی رقم‌ها کاهش یافت و در برخی رقم‌ها تفاوت معنی‌دار نبود. گزارش‌های مختلفی نشان داده است که کاهش رشد و عملکرد گلرنگ در اثر شوری به علت برخی تغییرات در فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی از جمله تعادل یونی و سیستم دفاع آنتی‌اکسیدان رخ داده است (Karray-Biuraoui et al., 2011). نتایج تحقیقات قادری‌فر و همکاران (۱۳۹۰) نشان داد که گیاه کتان در مرحله جوانه‌زنی مقاوم به تنش شوری بوده اما در مرحله گیاهچه‌ای حساس به

تنش شوری می‌باشد.

تحقیق حاضر به منظور بررسی و شناخت بهتر تحمل به شوری در گیاه کتان روغنی در شرایط تغذیه آهن انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش گلدانی در سال ۱۳۹۶ در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهی دانشکده علوم پایه دانشگاه یاسوج انجام گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. شوری با کلرید سدیم در پنج سطح (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار) و آهن (Fe-EDDHA) در سه سطح (۲۵، ۵۰ و ۷۵ میکرومولار) انتخاب شد. واحدهای آزمایشی شامل گلدان‌های با ابعاد ۲۰×۲۰ و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و حاوی ماسه نرم و کاملاً شسته شده بودند. کتان روغنی مورد استفاده رقم نورمن بود. در هر گلدان ۱۰ تا ۱۲ عدد بذر به عمق حدود ۳ سانتی‌متری قرار گرفت. از مرحله کاشت تا مرحله جوانه‌زنی آبیاری با آب مقطر صورت گرفت. سپس ماده غذایی تغییر یافته یک دوم هوگلند استفاده شد. ترکیب محلول تغییر یافته هوگلند مورد استفاده به صورت زیر بود (Mohtadi *et al.*, 2013):

3 mM KO₃, 2 mM Ca(NO₃)₂, 1 mM NH₄H₂PO₄, 0.5 mM MgSO₄, 25 μM FeEDDHA, 1 μM KCl, 2 μM MnSO₄, 25 μM H₃BO₃, 2 μM ZnSO₄, 0.1 μM CuSO₄ and 0.1 μM (NH₄)₆Mo₇O₂₄

دو هفته بعد از استقرار، گیاهان در گلدان تنک شدند و ۸

گیاه در هر گلدان باقی ماند. در مرحله چهار برگی، ابتدا تیمار آهن، به صورت محلول غذایی، براساس تیمارهای آزمایشی ذکر شده اعمال و بعد از آن تیمار شوری اعمال گردید. جهت اعمال شوری، اضافه کردن تدریجی شوری به میزان ۵۰ میلی‌مولار شوری در محلول هوگلند در هر سطح (جهت سازگار شدن گیاهان) انجام شد. در نوبت‌های بعدی این مقادیر افزایش یافت و بعد از حدود دو هفته کل تیمار شوری مربوط به هر سطح اعمال گردید و در نهایت به سطوح شوری مورد نظر (پنج سطح تنش شوری صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار محلول کلرید سدیم) رسید که معادل ۱/۳، ۱/۱۵، ۱/۸۹، ۱۶/۳۲ و ۲۱/۳ دسی زیمنس بر متر بود. تیمار به

صورت دو روز یک بار طی دو هفته اعمال شد. گیاهان در اتاقک کشت با دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد در روز و دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در شب و تناوب نوری ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی نگه داری شدند. دو هفته بعد از شروع اعمال شوری، از هر گلدان سه گیاه انتخاب گردید. نمونه‌گیری از جوان‌ترین برگ‌ها در هر گلدان در صبح زود انجام شد. به منظور جلوگیری از تغییر میزان پرولین، پروتئین و قندهای محلول، نمونه‌ها تا زمان استفاده در دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. در پایان آزمایش میزان سدیم، پتاسیم و آهن اندام‌های گیاهی (اندام هوایی و ریشه)، پرولین، قندهای محلول کل، پروتئین محلول برگ، وزن خشک ریشه و اندام هوایی، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز اندازه گیری شد.

بعد از برداشت گیاهان از گلدان‌ها، اندام هوایی و ریشه هر گیاه جدا گردید. نمونه‌ها به مدت دو روز در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. سپس ۱ گرم از نمونه خشک شده توزین و در کوره با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت خاکستر شد. خاکستر مورد نظر بعد از اضافه کردن ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک دو نرمال روی هیتر قرار داده شد. با شروع جوشیدن، محلول از کاغذ صافی عبور داده شد و حجم نمونه‌ها توسط آب دوبار تقطیر شده به ۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. سپس مقادیر سدیم و پتاسیم توسط دستگاه فلیم‌فتمتر اندازه‌گیری شدند (Patterson *et al.*, 1984). میزان آهن با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

میزان پرولین از روش Paquine و Lechasseur (۱۹۷۹) و میزان کل قندهای محلول نیز از روش Irigoyen و همکاران (۱۹۹۲) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پرولین و قندهای محلول ابتدا از ۰/۵ گرم از بافت برگی عصاره اتانولی تهیه شد. سپس میزان پرولین با کمک نین هیدرین و بنزن و با استفاده از منحنی استاندارد محاسبه شد.

برای محاسبه قندهای محلول، ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره الکی انتخاب شد و سپس ۳ میلی‌لیتر آنترون تازه تهیه شده به آن اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده شد.

پس از خنک شدن نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه، میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) قرائت گردید و با استفاده از منحنی استاندارد میزان قندهای محلول محاسبه گردید.

اندازه‌گیری پروتئین محلول برگ از روش Huang و Liu (۲۰۰۰) انجام شد. مقدار ۰/۲ گرم از بافت برگ نگهداری شده در فریزر (دمای ۴۰- درجه سانتی گراد) در هاون چینی سرد و در ظرف یخ با ۲ میلی‌لیتر بافر فسفات ۰/۱ مولار با اسیدیتة ۶/۸ هموزن شد و سپس سانتریفیوژ گردید. مایع بالایی بدست آمده برای اندازه‌گیری مقدار پروتئین محلول مورد استفاده قرار گرفت. جذب نمونه در طول موج ۵۹۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید.

برای اندازه‌گیری آنزیم پراکسیداز مخلوط واکنش حاوی ۲/۷۵۰ میلی‌لیتر بافر فسفات مونوسدیک (۲۵ میلی‌مولار) با pH برابر ۶/۸، ۱۰۰ میکرولیتر پیروگالول (۱۰ میلی‌مولار)، ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی و ۱۰۰ میکرولیتر آب اکسیژنه (۴۰ میلی‌مولار) به حجم نهایی ۳ میلی‌لیتر بود. تغییرات جذب نور پراکسیداز در طول موج ۴۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Kar and Mishra, 1976).

سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با استفاده از سنجش مهار واکنش احیای نوری نیتروبلوتترازولیوم (NBT) به فورمازون در ۵۶۰ نانومتر انجام گرفت (Beauchamp and Fridovich, 1971). تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS صورت گرفت و برای صفاتی که اثر متقابل معنی‌دار داشتند از روش برش‌دهی و مقایسه میانگین به روش L. S. Means استفاده گردید.

نتایج و بحث

میزان سدیم: میزان سدیم ریشه در سطح احتمال خطای ۱٪ تحت تأثیر شوری و آهن و در سطح احتمال خطای ۵٪ تحت تأثیر برهم‌کنش شوری و آهن قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین میزان سدیم ریشه در سطح شوری ۵۰ میلی‌مولار از مصرف

آهن ۷۵ میکرومولار بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۳/۵ برابر افزایش نشان می‌دهد و کمترین میزان آن در سطح شوری شاهد از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار بدست آمد (جدول ۲). جدول ۲، نشان می‌دهد که بیشترین میزان سدیم ریشه در سطح ۱۰۰ میلی‌مولار شوری، از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار ایجاد شد. در سطح ۱۵۰ میلی‌مولار شوری، بیشترین میزان سدیم ریشه از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار و در سطح ۲۰۰ میلی‌مولار شوری، بیشترین میزان سدیم ریشه از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار، ایجاد شد. میزان سدیم اندام هوایی در سطح احتمال خطای ۱٪ تحت تأثیر شوری و برهم‌کنش شوری و آهن و در سطح احتمال خطای ۵٪ تحت تأثیر آهن قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین میزان سدیم اندام هوایی در سطح شوری ۲۰۰ میلی‌مولار، از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۹ برابر افزایش نشان می‌دهد و کمترین آن در سطح شاهد، از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار حاصل شد (جدول ۲). جدول ۲، نشان می‌دهد که در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار، بیشترین میزان سدیم اندام هوایی از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار ایجاد شد. در سطح شوری ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار، بیشترین میزان سدیم اندام هوایی از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار بدست آمد. به طور کلی با افزایش شوری میزان سدیم ریشه و اندام هوایی افزایش یافت.

مطالعات انجام شده توسط Huang و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که محتوای یون سدیم در رنوتیپ‌های جو، با افزایش شوری افزایش پیدا کرد. بیشترین میزان تجمع سدیم در اندام هوایی گیاه دارویی شنبلیله مربوط به بیشترین سطح شوری و کمترین آن مربوط به تیمار شاهد بود (ارچنگی و همکاران، ۱۳۹۱). در تأیید نتایج بدست آمده، علت افزایش سدیم به این دلیل است که سدیم به صورت غیرفعال وارد ریشه‌ها می‌شود و در غلظت‌های بالا می‌تواند در غشای پلاسمایی جایگزین کلسیم شود که در اثر این جایگزینی قابلیت نفوذپذیری غشاء تغییر یافته باعث نشت پتاسیم از سلول می‌شود. در اثر محلول‌پاشی آهن، غلظت سدیم در گیاه آفتابگردان کاهش یافت (ترابی‌ان و زاهدی، ۱۳۹۲). در این آزمایش کاربرد آهن

جدول ۱- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس سدیم ریشه و اندام هوایی، پتاسیم ریشه و اندام هوایی، آهن ریشه و اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه کتان روغنی تحت تأثیر تنش شوری و کاربرد آهن

منابع تغییرات	درجه آزادی	سدیم ریشه	سدیم اندام هوایی	پتاسیم ریشه	پتاسیم اندام هوایی	آهن ریشه	آهن اندام هوایی	وزن خشک	وزن خشک ریشه
شوری	۴	۱۰۸/۵۴**	۶۱۱۲/۷۴**	۲۳۲۷**	۱۶۵**	۷۰۱۶۳۸**	۲۰۷۸۹**	۶۷۸/۹۴**	۴۹/۵۱۹**
آهن	۲	۵۳/۱۹**	۱۰۵۱/۱۴*	۲۷ ^{ns}	۸/۵۳ ^{ns}	۱۰۸۵۴۹**	۶۳۲۶**	۱۳۴/۴۶**	۰/۱۸ ^{ns}
شوری × آهن	۸	۲۲۴/۱۲*	۴۵۱/۱۶**	۱۴۰**	۲۷/۲۹**	۴۴۹۳۸۵**	۴۶۶۶**	۶۲/۰۷**	۸/۷۷۶**
خطای آزمایشی	۳۰	۷۹/۵۵	۲۲/۶۳	۹۱	۷/۶۸	۱۲۲۵	۲۶۹	۳/۱۱۸	۰/۶۰۹
درصد ضریب تغییرات		۹/۳۴	۸/۲۲	۷/۴۵	۱۰/۱۹	۱۴/۲۳	۱۴/۲۰	۴/۵۹	۱۰/۸۴

* و ** به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns معنی دار نمی باشد.

در برخی سطوح باعث کاهش سدیم و در برخی سطوح موجب افزایش سدیم شده است و روند مشخص بدست نیامد. غلظت زیاد سدیم در اندام هوایی دامنه‌ای از مشکلات اسمزی و متابولیک گیاه را موجب شده و سمیت احتمالی ناشی از تجمع بیش از حد این یون در اندام گیاهی و کاهش تولید ماده خشک را به دنبال خواهد داشت.

میزان پتاسیم: میزان پتاسیم ریشه و اندام هوایی در سطح احتمال خطای ۱٪ تحت تأثیر شوری و برهم‌کنش شوری و آهن قرارگرفت، اما اثر آهن بر این صفت معنی دار نبود (جدول ۱). بیشترین میزان غلظت پتاسیم ریشه در سطح شوری شاهد از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار بدست آمد و کمترین آن در سطح شوری ۲۰۰ میلی‌مولار از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۲/۵ برابر کاهش نشان می‌دهد (جدول ۲). جدول ۲، نشان می‌دهد در سطح شوری شاهد، مصرف آهن ۵۰ میکرومولار بیشترین میزان پتاسیم ریشه را ایجاد کرد. در بقیه سطوح شوری، بیشترین غلظت پتاسیم ریشه از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار حاصل شد. در سطح شاهد با افزایش آهن تا سطح ۵۰ میکرومولار میزان پتاسیم ریشه افزایش یافت. در سطوح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار شوری با افزایش آهن میزان پتاسیم ریشه افزایش یافت. در سطح ۲۰۰ میلی‌مولار شوری با افزایش آهن تا سطح ۵۰ میکرومولار، میزان پتاسیم ریشه کاهش و بعد افزایش یافت. نتایج نشان داد که با افزایش شوری میزان پتاسیم ریشه کاهش

می‌یابد. بیشترین میزان پتاسیم اندام هوایی در سطح شوری شاهد از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار بدست آمد و کمترین آن در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۴۳ درصد کاهش نشان می‌دهد (جدول ۲). جدول ۲، نشان می‌دهد که در سطح شوری شاهد، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار، مصرف کمترین میزان آهن باعث ایجاد بیشترین میزان پتاسیم اندام هوایی شد. در سطح شوری ۵۰ میلی‌مولار، بیشترین میزان پتاسیم اندام هوایی از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار، ایجاد شد. در سطح ۵۰ میلی‌مولار شوری، با افزایش آهن میزان پتاسیم اندام هوایی افزایش یافت. در سطح ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری، با افزایش آهن میزان پتاسیم اندام هوایی کاهش یافت. در سطح ۱۵۰ میلی‌مولار شوری، با افزایش آهن تا سطح ۵۰ میکرومولار، میزان پتاسیم کاهش و بعد افزایش یافت. به طور کلی با افزایش شوری میزان پتاسیم اندام هوایی نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت.

مطالعات انجام شده توسط Mahmoudi و همکاران (۲۰۰۵) نشان داد که تیمار آهن، محتوای پتاسیم عدس و لوبیا چشم بلبلی را در برگ و دانه به طور معنی‌داری افزایش داد. رحیمی و همکاران (۱۳۹۱) گزارش کردند که با افزایش شوری، مقدار یون پتاسیم در کلیه اندام‌های گلرنگ کاهش معنی‌داری یافت. در تأیید نتایج بدست آمده، برخی محققین کاهش غلظت پتاسیم برگ توسط شوری بالا را ناشی از کاهش

جدول ۲- مقایسه میانگین سطوح آهن برای سدیم ریشه و اندام هوایی، پتاسیم ریشه و اندام هوایی، آهن ریشه و اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه کتان روغنی در سطوح مختلف شوری

عامل‌های آزمایش		سدیم		پتاسیم		آهن ریشه		آهن اندام هوایی		وزن خشک	وزن ریشه
شوری	آهن	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	آهن ریشه	اندام هوایی	آهن ریشه	اندام هوایی	خشک اندام	وزن خشک ریشه
میلی مولار	میکرومولار	میلی گرم بر گرم وزن خشک	میلی گرم بر گرم وزن خشک	میکروگرم بر گرم وزن خشک	میلی گرم بر گرم وزن خشک	میلی گرم	میلی گرم	میلی گرم	میلی گرم	میلی گرم	میلی گرم
	۲۵	۴۲ ^a	۸/۹ ^a	۵۴ ^c	۳۳ ^a	۷۷۵ ^c	۱۳۰ ^b	۴۹/۱۶ ^b	۹/۴۱ ^c		
0	۵۰	۵۵ ^a	۷/۳ ^a	۷۷ ^a	۳۱ ^a	۹۶۳ ^b	۱۳۹ ^a	۴۹/۴۱ ^b	۱۱/۳۱ ^b		
	۷۵	۴۶ ^a	۹/۶ ^a	۷۰ ^b	۳۲ ^a	۱۲۹۹ ^a	۱۴۵ ^a	۵۸/۶۶ ^a	۱۳/۰۸ ^a		
	۲۵	۱۵۰ ^a	۵۳ ^a	۳۷ ^a	۲۱ ^b	۱۴۵۵ ^b	۱۲۷ ^c	۳۳/۸۳ ^a	۶/۷۳ ^b		
50	۵۰	۹۵ ^b	۵۳ ^a	۴۳ ^a	۲۸ ^{ab}	۱۵۰۳ ^b	۱۹۶ ^b	۳۸/۰۸ ^a	۷/۰۸ ^a		
	۷۵	۱۵۱ ^a	۵۳ ^a	۴۸ ^a	۲۹ ^a	۱۷۲۵ ^a	۲۷۲ ^a	۴۲/۰۸ ^a	۸/۳۳ ^a		
	۲۵	۱۴۰ ^a	۳۲ ^a	۳۲ ^a	۲۳ ^a	۱۴۹۹ ^c	۹۷ ^a	۳۰/۵۸ ^c	۸/۰۰ ^a		
100	۵۰	۱۳۸ ^a	۳۳ ^a	۳۳ ^a	۱۸ ^a	۱۶۲۳ ^b	۹۱ ^a	۳۷/۴۱ ^b	۶/۳۳ ^b		
	۷۵	۱۱۶ ^b	۳۴ ^a	۳۴ ^a	۲۰ ^a	۱۷۹۳ ^a	۱۰۸ ^a	۴۱/۴۱ ^a	۶/۴۵ ^b		
	۲۵	۹۶ ^b	۲۷ ^a	۲۷ ^a	۲۳ ^a	۷۶۸ ^a	۶۹ ^b	۳۲/۲۵ ^b	۵/۴۱ ^b		
150	۵۰	۱۴۴ ^a	۲۸ ^a	۲۸ ^a	۱۸ ^a	۷۲۰ ^a	۱۱۶ ^a	۳۷/۷۵ ^a	۶/۰۰ ^b		
	۷۵	۱۰۹ ^b	۳۱ ^a	۳۱ ^a	۲۰ ^a	۶۲۳ ^a	۵۸ ^b	۳۸/۴۱ ^a	۶/۵۰ ^a		
	۲۵	۱۱۹ ^b	۵۵ ^c	۲۹ ^b	۲۶ ^a	۱۳۸۹ ^a	۴۶ ^c	۲۷/۶۶ ^a	۴/۷۵ ^b		
200	۵۰	۷۴ ^c	۹۱ ^a	۱۹ ^c	۲۴ ^a	۹۵۱ ^b	۹۱ ^b	۲۹/۰۸ ^a	۴/۹۱ ^b		
	۷۵	۱۴۵ ^a	۸۱ ^b	۴۰ ^a	۲۲ ^a	۱۵۹۲ ^a	۱۲۶ ^a	۲۹/۶۶	۶/۲۵ ^a		

در هر ستون و در هر سطح شوری، میانگین‌های دارای حرف مشترک از نظر آماری در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند (براساس رویه L. S. Means)

با افزایش آهن میزان آهن ریشه افزایش یافت. هم‌چنین در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار، از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار بیشترین میزان آهن ریشه ایجاد شد. میزان آهن ریشه از سطح شاهد تا ۱۰۰ میلی‌مولار شوری روند افزایشی را نشان می‌دهد. بیشترین میزان آهن اندام هوایی از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار، در سطح ۵۰ میلی‌مولار شوری بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۱/۵ برابر افزایش نشان می‌دهد و کمترین آن از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار، در سطح شوری ۲۰۰ میلی‌مولار بدست آمد (جدول ۲). جدول ۲، نشان می‌دهد در سطح شوری ۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار، بیشترین میزان آهن اندام هوایی بدست آمد. در سطح ۱۵۰ میلی‌مولار شوری از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار

جذب و تجمع پتاسیم در بافت ریشه می‌دانند. یکی از اثرات شوری می‌تواند از دست رفتن وظایف یون پتاسیم در برگ‌های گیاه باشد. بالا رفتن سطح کلرید سدیم در محیط ریشه جذب عناصر غذایی، مخصوصاً پتاسیم و کلسیم را کاهش می‌دهد.

میزان آهن: میزان آهن اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال ۱٪ تحت تأثیر شوری، آهن و برهم‌کنش آهن و شوری قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین میزان آهن ریشه در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار، از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد معادل ۱/۵ برابر افزایش نشان می‌دهد و کمترین آن در سطح ۱۵۰ میلی‌مولار شوری، از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار بدست آمد (جدول ۱). جدول ۱، نشان می‌دهد در سه سطح شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار شوری،

خشک ریشه افزایش یافت و با افزایش سطوح شوری میزان وزن خشک ریشه کاهش یافت.

کشاوری و ملکوتی (۱۳۸۴) بیان کردند که شوری وزن خشک ریشه گندم را به میزان ۸۰ درصد کاهش داد. سلامی و همکاران (۱۳۸۵) گزارش کردند که در دو گیاه دارویی سنبل الطیب و زیره با افزایش سطح شوری، وزن خشک ریشه و وزن خشک ساقه کاهش پیدا کرد. کمبود آهن منجر به زرد برگی، کاهش وزن خشک بخش هوایی و ریشه و تغییر غلظت و محتوای آهن و سایر عناصر غذایی در بافت‌های گیاه می‌شود (جوکار و رونقی، ۱۳۹۴). با افزایش شوری، وزن خشک برگ و ساقه و ریشه در نعنای سبز کاهش یافت (صفری محمدیه و همکاران، ۱۳۹۴). از دلایل کاهش وزن خشک این است که شوری رشد ریشه را از طریق کاهش فشار تورگر در توسعه بافت‌های ناشی از پتانسیل آب پایین در محیط ریشه کاهش داده و با کاهش آب در گیاه، وزن خشک ریشه کاهش خواهد یافت (Alam et al., 2004). هم‌چنین با توجه به اینکه ریشه اولین اندامی است که با تنش شوری مواجه می‌شود، مقدار زیادی از انرژی را که از اندام‌های هوایی جهت رشد دریافت می‌کند، صرف مقابله با تنش شوری می‌نماید که کاهش وزن خشک ریشه را به دنبال خواهد داشت.

قندهای محلول برگ: میزان محتوای قندهای محلول در سطح احتمال ۱٪ تحت تأثیر شوری، آهن و برهم‌کنش شوری و آهن قرار گرفت (جدول ۳). طبق نتایج بیشترین میزان قندهای محلول در سطح ۲۰۰ میلی‌مولار شوری، از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۹۲/۴۴ درصد افزایش نشان می‌دهد و کمترین میزان آن در سطح شوری شاهد، از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار بدست آمد (جدول ۴). در دو سطح شاهد و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری، با افزایش سطح آهن میزان قند محلول افزایش یافت. در سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار شوری، بیشترین میزان قند محلول در سطح آهن ۲۵ میکرومولار بدست آمد. براساس نتایج این آزمایش با افزایش سطح شوری میزان قندهای محلول افزایش یافت.

بیشترین میزان آهن اندام هوایی ایجاد شد. در سه سطح شاهد، ۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری، با افزایش آهن میزان آهن اندام هوایی افزایش یافت. آهن اندام هوایی تا سطح ۵۰ میلی‌مولار شوری روند افزایشی و در سطوح بالاتر روند کاهشی را نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که در ریشه غلظت آهن نسبت به اندام هوایی بیشتر بود. افزایش غلظت آهن در ریشه نسبت به اندام هوایی ممکن است به علت تجمع این عنصر در آپوپلاست ریشه و عدم انتقال آن به اندام هوایی باشد (ترابیان و زاهدی، ۱۳۹۲). اثر متقابل شوری و آهن در گیاهان مختلف رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد، به طوریکه تیمار شوری باعث کاهش معنی‌دار مقدار آهن در ریشه و شاخساره پسته گردید و این کاهش در گیاهان رشد یافته روی خاک‌های شنی نسبت به خاک‌های رسی شدیدتر بود (اسکندری و مظفری، ۱۳۹۱). نتایج دیگر محققین در مورد آفتابگردان نشان داد که با افزایش شوری، غلظت آهن افزایش یافت (عمادی و همکاران، ۱۳۹۳).

وزن خشک: وزن خشک ریشه و اندام هوایی در سطح احتمال ۱٪ تحت تأثیر شوری، آهن و برهم‌کنش شوری و آهن قرار گرفت. اما اثر آهن بر وزن خشک ریشه معنی‌دار نبود (جدول ۱). بیشترین میزان وزن خشک اندام هوایی در سطح شوری شاهد، از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار، بدست آمد و کمترین میزان آن در سطح شوری ۲۰۰ میلی‌مولار، از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۴۳ درصد کاهش یافت. در همه سطوح شوری، با افزایش سطح آهن، میزان وزن خشک اندام هوایی افزایش یافت. با افزایش سطوح شوری میزان وزن خشک اندام هوایی کاهش یافت. طبق نتایج (جدول ۲)، بیشترین میزان وزن خشک ریشه در سطح شاهد، از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار بدست آمد و کمترین میزان وزن خشک ریشه در سطح ۲۰۰ میلی‌مولار، از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار، بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۸۸ درصد کاهش یافت. به طور کلی با افزایش سطح آهن در همه سطوح شوری به جز ۱۰۰ میلی‌مولار، میزان وزن

مطالعات انجام شده توسط Najafi و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که قند محلول در مرزه تابستانی (*Satureja hortensis*) با افزایش شوری از صفر تا ۷۰ میلی مولار افزایش یافت و در ۱۰۰ میلی مولار کاهش نشان داد. تحقیقات انجام شده نشان داده است که تنش شوری باعث کاهش قابل توجهی در رنگدانه‌های فتوسنتزی، کربوهیدرات‌ها، پروتئین و جذب منیزیم، پتاسیم، کلسیم و فسفر در سه رقم کتان می‌شود (Sadak and Dawood, 2014). قندها سبب تنظیم اسمزی و نیز پایداری غشاها و پروتئین‌های موجود در سلول می‌شوند. عیسوند و همکاران (۱۳۹۳) اثر آهن را در گیاهان بررسی کردند و اظهار داشتند آهن عامل مهمی در تولید کربوهیدرات‌هاست و کمبود آن به کاهش تولید نشاسته و قند در گیاه منجر می‌شود که علت آن کاهش کلروفیل و در نتیجه کاهش فتوسنتز است. براساس نتایج تحقیق حاضر ظاهراً قند محلول نقش چندانی در تنظیم اسمزی کتان در شرایط شوری بازی نمی‌کند و عمده بار بر دوش تجمع املاح مثل سدیم و پتاسیم است.

پرولین: میزان پرولین در سطح احتمال ۱٪ تحت تأثیر شوری، آهن و برهم‌کنش شوری و آهن قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین میزان پرولین در سطح ۱۵۰ میلی مولار شوری، از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۸۱/۳۸ درصد افزایش نشان می‌دهد و کمترین میزان پرولین در سطح شاهد، از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار بدست آمد. جدول ۴، نشان می‌دهد در دو سطح شاهد و ۲۰۰ میلی مولار شوری، بیشترین میزان پرولین از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار ایجاد شد. در سطح ۱۰۰ میلی مولار شوری، مصرف آهن ۵۰ میکرومولار با بیشترین میزان پرولین همراه بود. در سطح ۱۵۰ میلی مولار شوری، بیشترین میزان پرولین از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار، ایجاد شد. در سه سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مولار شوری، با افزایش آهن میزان پرولین افزایش یافت. در سطح ۲۰۰ میلی مولار شوری، با افزایش آهن میزان پرولین تا سطح ۵۰ میکرومولار کاهش و بعد افزایش یافت. به طور کلی مقدار پرولین با افزایش سطح شوری

افزایش یافت.

افزایش پرولین در گیاهان تحت تنش شوری در واقع نوعی واکنش از طرف گیاه به کاهش پتاسیل آب در محیط ریشه است. پرولین احتمالاً در سلول‌های تحت تنش، نقش آنتی‌اکسیدانی دارد و با تجمع در سیتوپلاسم سلول‌ها از طریق کاهش پتاسیل اسمزی درون سلولی تجمع نمک در واکوئل را تنظیم می‌کنند (هراتی و همکاران، ۱۳۹۵). مطالعات Li و همکاران (۲۰۱۰) نیز افزایش پرولین برگ کرچک را در سطوح بالای شوری نشان داد. عمادی و همکاران (۱۳۸۸) با بررسی تنش شوری بر روی گیاه چغندر قند مشاهده کردند که با افزایش کلرید سدیم تجمع پرولین در اندام هوایی افزایش می‌یابد که این می‌تواند باعث بالا رفتن نسبی تحمل به شوری در گیاه گردد. نوری و همکاران (۱۳۹۱) نشان دادند که با افزایش شوری، میزان پرولین در ساقه بابونه شیرازی افزایش یافته و کمترین مقدار در تیمار شاهد مشاهده گردید. افزایش چندین برابری پرولین در سطوح بالای شوری نشان از نقش این اسمولیت در تنظیم اسمزی کتان در شرایط شوری دارد. جالب است در مواردی که آهن موجب کاهش قند محلول شده است در عوض میزان پرولین را افزایش داده و برعکس. بنابراین به نظر می‌رسد تجمع آمینواسید پرولین به عنوان سازوکاری مؤثر جهت کاهش فعالیت رادیکال‌های آزاد اکسیژن و حفظ محتوای آب سلول گیاه تحت شرایط شوری باشد.

پروتئین محلول برگ: پروتئین محلول برگ در سطح احتمال ۱٪ تحت تأثیر شوری و برهم‌کنش شوری و آهن قرار گرفت، اما اثر آهن بر آن معنی‌دار نبود (جدول ۳). طبق نتایج جدول ۴، بیشترین میزان پروتئین در سطح شوری ۵۰ میلی مولار، از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۴/۴ درصد افزایش نشان می‌دهد و کمترین آن در سطح شوری ۲۰۰ میلی مولار، از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار بدست آمد. در سه سطح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار شوری، بیشترین میزان پروتئین محلول برگ در سطح آهن ۲۵ میکرومولار بدست آمد. در سطح ۱۵۰ میلی مولار شوری، با افزایش سطح آهن ابتدا مقدار پروتئین

جدول ۳- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس محتوای قند محلول، پرولین، پروتئین، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز در کتان روغنی تحت تنش شوری و کاربرد آهن

منابع تغییرات	درجه آزادی	قندهای محلول	پرولین	پروتئین	سوپراکسید دیسموتاز	پراکسیداز
شوری	۴	۲۱۱/۵۸**	۲۶۵۱۸۲/۷۶**	۳/۴۴۷**	۰/۰۳۶۱**	۰/۰۰۵۲**
آهن	۲	۶/۱۱۸**	۱۶۲۱/۸۱۹**	۰/۴۸۶ ^{n.s}	۰/۰۱۱۵**	۰/۰۰۳۲**
شوری × آهن	۸	۲۶/۴۵۰**	۵۶۶۴/۳۹۷**	۲/۴۲۱**	۰/۰۰۸۱**	۰/۰۰۱۳**
خطا	۳۰	۰/۳۸۸	۱۶۶/۴۹۷	۰/۱۵۴۷	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۲۴
ضریب تغییرات	درصد	۲/۶۴	۳/۵۴	۵/۳۳	۱۲	۱۱

* و ** به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns معنی دار نمی باشد.

محلول برگ افزایش و سپس کاهش یافت. در سطح ۲۰۰ میلی مولار شوری، با افزایش سطح آهن تا ۵۰ میکرومولار، میزان پروتئین محلول برگ کاهش و سپس افزایش یافت. کاهش در محتوای پروتئین می تواند به دلیل کاهش فعالیت آنزیم های نیترات رد اکناز، گلوتامین سنتتاز و گلو مین ۲-اگزالو گلو تارات آمینو ترنسفرز در اثر تنش شوری باشد (دولت آبادیان و همکاران، ۱۳۸۸). از آنجایی که آهن یکی از مهمترین عناصری است که در متابولیسم نیتروژن و سطح برگ گیاه نقش دارد، پس می توان انتظار داشت که با اعمال تیمار آهن در گیاهانی که علایم کمبود این عنصر را نشان می دهند، پروتئین سازی افزایش یابد (Tewari et al., 2005). گزارشات متعددی مبنی بر کاهش پروتئین های محلول در گیاهان تحت تنش شوری وجود دارد. از جمله می توان به گزارشات Bacelar و همکاران (۲۰۰۶) بر روی گیاه زیتون اشاره داشت. مطالعات انجام شده توسط حسین زاده و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد که میزان پروتئین محلول برگ گیاه اسفرزه با افزایش شوری تا سطح ۵۰ میلی مولار افزایش و سپس تا سطح ۱۵۰ میلی مولار کاهش و نهایتاً در ۲۰۰ میلی مولار افزایش یافت. در این آزمایش در مجموع میزان پروتئین محلول برگ آن چنان تحت تأثیر شوری قرار نگرفت که احتمالاً بدین معنی است که تولید پرولین ناشی از ساخت بیشتر آن بوده و نه حاصل از تجزیه پروتئین هاست.

فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان: نتایج تجزیه واریانس

نشان داد که میزان فعالیت آنزیم های پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال ۱٪ تحت تأثیر شوری، آهن و برهم کنش شوری و آهن قرار گرفت (جدول ۳). طبق نتایج جدول ۴، بیشترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در سطح شوری ۵۰ میلی مولار، از مصرف آهن ۵۰ میکرومولار بدست آمد و کمترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در سطح شوری ۱۵۰ میلی مولار، از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار بدست آمد. بیشترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سطح شوری ۵۰ میلی مولار، از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار و کمترین آن در سطح شوری ۲۰۰ میلی مولار، از مصرف آهن ۲۵ میکرومولار بدست آمد. میزان فعالیت این دو آنزیم تا سطح ۵۰ میلی مولار شوری افزایش و بعد از آن روند کاهشی داشت. اثر غلظت های آهن در سطوح مختلف شوری متفاوت بود به طوریکه در سطح شاهد بیشترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز از مصرف آهن ۷۵ میکرومولار حاصل شد. در سطح ۵۰ و ۱۵۰ میلی مولار شوری، مصرف آهن ۵۰ میکرومولار، با بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز همراه بود. در دو سطح شاهد و ۲۰۰ میلی مولار شوری با افزایش آهن، میزان فعالیت پراکسیداز افزایش یافت. در سطح ۱۰۰ میلی مولار شوری، با افزایش آهن میزان فعالیت پراکسیداز کاهش یافت. میزان فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی مولار شوری با افزایش میزان آهن افزایش یافت. در سطح ۱۵۰ میلی مولار شوری، با افزایش آهن تا سطح ۵۰ میکرومولار

جدول ۴- مقایسه میانگین سطوح آهن برای قندمحلول برگ، پرولین، پروتئین محلول برگ، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز کتان روغنی در سطوح مختلف شوری

عوامل های آزمایش		قند محلول برگ	پرولین	پروتئین محلول برگ	فعالیت آنزیم	فعالیت آنزیم
شوری	آهن				پراکسیداز	سوپراکسید دیسموتاز
واحد فعالیت به						
میلی مولار	میکرومولار	میلی گرم بر گرم وزن تر برگ	میکروگرم برگرم وزن تر برگ	میلی گرم بر گرم وزن تر برگ	ازای هر میلی گرم پروتئین	واحد فعالیت بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین
	۲۵	۱۷/۷۴ ^b	۱۴۳/۳۱ ^a	۷/۹۰ ^a	۰/۰۱۸ ^c	۰/۰۴۸ ^a
صفر	۵۰	۱۸/۶۳ ^a	۱۱۱/۵۵ ^b	۷/۳۹ ^{ab}	۰/۰۴۹ ^b	۰/۰۴۸ ^a
	۷۵	۱۹/۹۳ ^a	۱۰۴/۸۷ ^b	۷/۰۱ ^a	۰/۰۹۰ ^a	۰/۰۳۵ ^a
	۲۵	۲۲/۷۴ ^a	۲۲۰/۲۱ ^b	۸/۶۲ ^a	۰/۰۸۲ ^b	۰/۱۱۵ ^b
۵۰	۵۰	۲۱/۷۴ ^a	۲۷۸/۹۶ ^a	۸/۲۵ ^b	۰/۰۹۲ ^a	۰/۱۱۴ ^b
	۷۵	۱۸/۳۵ ^b	۲۸۷/۲۸ ^a	۶/۱۰ ^c	۰/۰۷۱ ^c	۰/۳۱۶ ^a
	۲۵	۲۲/۶۰ ^a	۳۴۶/۵۹ ^b	۸/۱۲ ^a	۰/۰۵۶ ^a	۰/۱۱۶ ^b
۱۰۰	۵۰	۲۰/۸۵ ^b	۴۴۹/۴۶ ^a	۸/۰۲ ^a	۰/۰۳۵ ^b	۰/۱۴۵ ^a
	۷۵	۲۲/۳۴ ^a	۴۴۷/۵۶ ^a	۷/۸۳ ^a	۰/۰۱۹ ^c	۰/۱۵۹ ^a
	۲۵	۲۷/۶۰ ^a	۵۲۲/۷۹ ^b	۸/۰۴ ^{ab}	۰/۰۱۴ ^b	۰/۰۷۲ ^a
۱۵۰	۵۰	۲۱/۲۳ ^b	۵۴۳/۶۰ ^b	۸/۲۴ ^a	۰/۰۳۴ ^a	۰/۰۴۷ ^b
	۷۵	۲۶/۸۵ ^a	۵۶۳/۴۷ ^a	۷/۵۸ ^b	۰/۰۱۳ ^b	۰/۰۵۶ ^{ab}
	۲۵	۲۶/۳۲ ^b	۵۳۵/۲۷ ^a	۷/۱۵ ^a	۰/۰۲۶ ^a	۰/۰۲۸ ^b
۲۰۰	۵۰	۳۳/۱۴ ^a	۴۳۷/۲۰ ^c	۶/۰۶ ^a	۰/۰۳۲ ^a	۰/۰۴۵ ^{ab}
	۷۵	۳۴/۱۴ ^a	۴۷۷/۹۹ ^b	۷/۷۸ ^a	۰/۰۳۳ ^a	۰/۰۵۸ ^a

در هر ستون و در هر سطح شوری، میانگین‌های دارای حرف مشترک از نظر آماری در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند (براساس رویه L. S. Means)

سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیدز و کاتالاز گردید (Agarwal and Pandey, 2004). شوری باعث افزایش فعالیت کاتالاز و پراکسیداز در گیاه شنبلیله گردید (پسندی‌پور و همکاران، ۱۳۹۲). از آنجایی که در تنش شدید شوری سنتز پروتئین‌ها کاهش می‌یابد در نتیجه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نیز کاهش می‌یابد (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۴).

میزان فعالیت سوپراکسید دیسموتاز کاهش و بعد افزایش یافت.

تحت شرایط کمبود عناصر ریزمغذی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت کاهش یافته و لذا حساسیت گیاهان به تنش‌های محیط افزایش می‌یابد (پیوندی و همکاران، ۱۳۹۰). مطالعات روی گیاه اسفناج نشان داد شوری موجب افزایش تنش اکسیداتیو و مقدار H_2O_2 و افزایش فعالیت آنزیم‌های

نتیجه گیری

در این گیاه شوری تأثیر چندانی بر پروتئین محلول برگ نداشت و اثر آهن بر آن معنی‌دار نبود. وزن خشک ریشه و اندام هوایی در غالب سطوح شوری با افزایش شوری کاهش و با افزایش آهن افزایش یافت. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از عنصر ریز مغذی آهن در برخی سطوح شوری می‌تواند باعث بهبود اثرات تنش شوری در گیاه کتان روغنی شود.

نتایج نشان داد که در گیاه کتان روغنی با افزایش سطح شوری، میزان سدیم ریشه و اندام هوایی افزایش ولی میزان پتاسیم کاهش یافت. همچنین در این گیاه افزایش سطح شوری باعث افزایش محتوای قند محلول و پرولین برگ شد. در سه سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار شوری، با افزایش آهن میزان پرولین افزایش یافت. در دو سطح شاهد و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری، با افزایش سطح آهن میزان قند محلول افزایش یافت.

منابع

- آذری، آ.، مدرس ثانوی، س. ع. م.، عسکری، ح.، قناتی، ف.، ناجی، ا. م. و علیزاده، ب. (۱۳۹۱) اثر تنش شوری بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو گونه کلزا و شلغم روغنی (*Brassica napus* and *B. rapa*). مجله علوم زراعی ایران: ۱۳۵-۱۲۱.
- ارچنگی، آ.، خدامباشی، م. و محمدخانی، ع. (۱۳۹۱) تأثیر تنش شوری بر خصوصیات مورفولوژیک و میزان عناصر سدیم، پتاسیم و کلسیم در گیاه دارویی شنبلیله (*Trigonella foenum graecum*) تحت شرایط کشت هیدروپونیک. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۱۰: ۳۳-۴۰.
- اسکندری، س. و مظفری، و. (۱۳۹۱) تأثیر سطوح شوری و مقادیر مختلف مس بر جذب عناصر غذایی کم مصرف در شاخساره و ریشه دو رقم پسته (*Pistacia vera* L.). در شرایط گلخانه‌ای. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۱۲: ۲۹-۴۲.
- اشرفی، ا.، رزمجو، ج. و زاهدی، م. (۱۳۹۴) بررسی اثر تنش شوری بر خصوصیات بیوشیمیایی گیاهچه‌ها و ارتباط آن با تحمل به شوری ارقام یونجه در شرایط مزرعه. نشریه زراعت ۱۰۹: ۴۳-۵۸.
- امید بیگی، ر. (۱۳۷۹) تولید و فرآوری گیاهان دارویی. جلد ۲، انتشارات آستان قدس رضوی.
- پرهیزگارخاجانی، ف.، ایران نژاد، ح.، امیری، ر.، اورکی، ح. و مجیدیان، م. (۱۳۹۱) تأثیر سطوح مختلف نیتروژن، فسفر و پتاسیم بر خصوصیات کمی و کیفی کتان روغنی. مجله تولید گیاهان زراعی ۵: ۳۷-۵۹.
- پسندی‌پور، ا.، فرح بخش، ح.، صفاری، م. و کرامت، ب. (۱۳۹۲) اثر سالیسیک اسید بر برخی واکنش‌های فیزیولوژیک گیاه شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*) تحت تنش شوری. نشریه علمی- پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی ۲: ۲۱۵-۲۲۸.
- پیوندی، م.، پرنده، ه. و میرزا، م. (۱۳۹۰) مقایسه تأثیر نانو کلات آهن با کلات آهن بر پارامترهای رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ریحان (*Ocimum basilicum*). تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی ملکولی ۴: ۸۹-۹۸.
- ترابیان، ش. و زاهدی، م. (۱۳۹۲) تأثیر تغذیه برگی سولفات آهن به دو شکل معمول و نانو ذرات بر رشد ارقام آفتابگردان تحت تنش شوری. مجله علوم گیاهان زراعی ۱: ۱۰۹-۱۱۸.
- جوکار، ل. و رونقی، ع. (۱۳۹۴) اثر محلول‌پاشی سطوح مختلف آهن بر رشد و غلظت برخی عناصر غذایی در گیاه سورگوم. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۲۲: ۱۶۳-۱۷۳.
- حسین زاده، پ.، مهتدی، ا.، موحدی دهنوی، م. و آسمانه، ط. (۱۳۹۵) اثر غلظت‌های مختلف روی بر برخی خصوصیات فیزیولوژیک گیاه اسفرزه (*Plantago ovate* L.). تحت تنش شوری. فرآیند و کارکرد گیاهی ۱۵: ۱۵۷-۱۶۸.
- حیدری، م. و مصری، ف. (۱۳۸۹) بررسی سطوح مختلف شوری بر واکنش‌های فیزیولوژیکی و جذب عناصر سدیم و پتاسیم در گندم. مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۱: ۸۳-۹۴.

- دولت آبادیان، آ.، مدرس ثانوی، س. ع. م. و شریفی، م. (۱۳۸۸) اثر تغذیه برگ با آسکوربیک اسید بر فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان، تجمع پرولین و لیپید پراکسیداسیون کلزا (*Brassica napus L.*) در شرایط تنش شوری. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۴۷: ۶۲۰-۶۱۱.
- رجایی، م. و دستفال، م. (۱۳۹۶) بررسی عملکرد و شاخص‌های تحمل به شوری در لاین‌ها و ارقام گندم تحت شرایط شور. تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۱۰: ۱۵۰-۱۳۹.
- رحیمی، ا.، زیبایی، س. و دشتی، ح. (۱۳۹۱) تأثیر پرایمینگ بذر بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک رقم گلداشت گلرنگ در شرایط تنش شوری. مجله تولید و فراوری محصولات زراعی و باغی ۳: ۱۴-۱.
- سپهری، ع. و وزیری امجد، ز. (۱۳۹۴) اثر نانو کودهای آهن و روی بر عملکرد کمی کاسنی در تراکم‌های مختلف کاشت. ویژه نامه نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار ۲۱: ۷۴-۶۱.
- سلامی، م.، صفرنژاد، ع. و حمیدی، ح. (۱۳۸۵) اثر تنش شوری بر خصوصیات مورفولوژی زیره سبز (*Cuminum cyminum*) و سنبل الطیب (*Valeriana officinalis*). پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی ۷۲: ۸۳-۷۷.
- صفری محمدیه، ز.، مقدم، م.، عابدی، ب. و سمیعی، ل. (۱۳۹۴) تأثیر تنش شوری بر برخی پارامترهای عملکردی و خصوصیات مورفولوژیک گیاه نعناع سبز (*Mentha spicata L.*) در شرایط هیدروپونیک. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۲۳: ۱۰۷-۹۷.
- عمادی، س. س.، زاهدی، م.، عشقی زاده، ح. ر. و نوری‌پور سی سخت، ج. (۱۳۹۳) تأثیر سطوح مختلف آهن محلول غذایی بر پاسخ سه رقم آفتابگردان به تنش شوری. علوم و فنون کشت‌های گلخانه ای ۱۷: ۲۵-۱۳.
- عمادی، ع. ر.، نورانی آزاد، ح. و برزو، آ (۱۳۸۸) بررسی اثرات شوری بر برخی خواص فیزیولوژیک چغندرقد (*Beta vulgaris L.*). گیاه و زیست بوم ۱۹: ۲۵-۱۷.
- عیسوند، ح.، اسماعیلی، ع. و محمدی، م. (۱۳۹۳) بررسی اثر سطوح مختلف نانو اکسید آهن بر برخی ویژگی‌های کمی و کیفی و فیزیولوژیک چهار رقم گندم پاییزه کشور (*Triticum aestivum*) در وضعیت اقلیمی خرم آباد. نشریه علوم گیاهان زراعی ایران ۲: ۲۹۸-۲۸۷.
- قادر فر، ف.، اکبرپور، و.، خاوری، ف. و احتشام‌نیا، ع. (۱۳۹۰) تعیین آستانه تحمل به شوری در مرحله جوانه‌زنی در شش گیاه دارویی. مجله پژوهش‌های تولید گیاهی ۱۸: ۲۴-۱۵.
- کشاورز، پ. و ملکوتی، م. ج. (۱۳۸۴) اثر روی و شوری بر رشد، ترکیبات شیمیایی و بافت آوندی گندم. مجله علوم آب و خاک ۱۹: ۱۳۰-۱۲۱.
- کیانی چالمردی، ز. و عبدل زاده، ا. (۱۳۹۱) نقش سیلیکون در کاهش کمبود و سمیت آهن در کشت هیدروپونیک گیاه برنج (*Oryza sativa L.*). علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۱۲: ۸۸-۷۹.
- موحدی دهنوی، م.، رنجبر، م.، یدوی، ع. و کاووسی، ب. (۱۳۸۹) اثر سایکوسل بر میزان پرولین، قندهای محلول، پروتئین، درصد روغن و اسیدهای چرب کتان روغنی تحت تنش خشکی در شرایط گلدانی. تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۲: ۱۳۸-۱۲۹.
- میرزاپور، م. ه. و خوش گفتارمنش، آ. ح. (۱۳۸۷) تأثیر کوددهی آهن بر رشد، عملکرد و مقدار روغن دانه آفتابگردان در یک خاک آهکی شور- سدیمی. پژوهش کشاورزی: آب و خاک و گیاه در کشاورزی ۴: ۷۴-۶۱.
- نوری، ک.، امید، ح.، نقدی بادی، ح.، ترابی ح. و فتوکیان، م. ح. (۱۳۹۱) تأثیر شوری آب و خاک بر عملکرد گل، ترکیبات محلول، محتوی عناصر شوری و کیفیت اسانس بابونه شیرازی (*Matricaria recutita L.*). پژوهش آب در کشاورزی ۴: ۳۷۸-۳۶۷.

- وزیری کته‌شوری، س.، دانشور، م.، سهرابی، ا. و نظریان فیروزآبادی، ف. (۱۳۹۲) تأثیر مقادیر مختلف فسفر و محلول پاشی آهن و روی بر عملکرد دانه نخود زراعی (*Cicer arietinum* L.). به زراعی کشاورزی ۲: ۳۰-۱۷.
- هراتی، ا.، کاشفی، ب و متینی‌زاده، م. (۱۳۹۵) بررسی کاهش اثرات سوء تنش شوری بر صفات موفولوژیکی و فیزیولوژیکی آویشن دنایی (*Thymus daenensis* Celak.) از طریق کاربرد اسید سالیسیلیک. فناوری تولیدات گیاهی ۲: ۱۱۱-۱۲۵.
- Alam, M. Z., Stuchbury, T., Naylor, R. E. L. and Rashid, M. A. (2004) Effect of salinity on growth of some modern rice cultnars. *Journal of Agronomy* 3: 1-10.
- Agarwal, S. and Pandey, V. (2004) Antioxidant enzyme responses to NaCl stress in *Cassia angustifolia*. *Biologia Plantarum* 48: 555-560.
- Bacelar, E. A., Santos, D. L., Moutinho-Pereira, J. M., Goncalves, B. C. Ferreira, H. F. and Correia, C. M. (2006) Immediate responses and adaptive strategies of three olive cultivars under contrasting water availability regimes: Changes on structure and chemical composition of foliage and oxidative damage. *Plant Science* 170: 596-605.
- Beauchamp, C. and Fridovich, I. (1971) Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry* 44: 276-278.
- El-Fouly, M. M., Mobarak, Z. M. and Salama, Z. A. (2011) Micronutrients (Fe, Mn, Zn) foliar spray for increasing salinity tolerance in wheat *Triticum aestivum* L. *African Journal of Plant Science* 5: 314- 322.
- Huang, Y., Zhang, G., Wu, F., Chen, J. and Xiao, Y. (2006) Interaction of salinity and cadmium stress on antioxidant enzyme, sodium, and cadmium accumulation in four barley genotypes. *Journal of Plant Nutrition* 29: 2215- 2225.
- Irigoyen, J. J., Emerich, D.W. and Sanchez-Diaz, M. (1992) Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum* 84: 55-60.
- Karray-Bouraoui, N., Harbaoui, F., Rabhi, M., Jallali, I., Ksouri, R. Attia, H. Msilini, N. and Lachaal, M. (2011) Different antioxidant responses to salt stress in two different provenances of *Carthamus tinctorius* L. *Acta Physiologiae Plantarum* 33: 1435-1444.
- Kar, M. and Mishra, D. (1976) Catalase, peroxidase and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology* 57: 315-319.
- Kumar, V., Shriram, V., Jawali, N. and Shitole, M. G. (2007) Differential response of indica rice genotypes to NaCl stress in relation to physiological and biochemical parameters. *Archives of Agronomy and Soil Science* 53: 581-592.
- Li, G. S., Wanb, J. Zhoua, Z. Yanga and Qin, P. (2010) Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.). Seedlings to salt stress levels. *Industrial Crops and Products* 31: 13-19.
- Liu, X. Z. and Huang, B. R. (2000) Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping bentgrass. *Crop Science* 40: 503-510.
- Mahmoudi, H., Ksouria. R. Gharsalli, M. and Lachaal, M. (2005) Differences in responses to iron deficiency between two legumes: lentil (*Lens culinaris* L.) and chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Plant Physioly* 162: 1237-1245.
- Mohtadi A., Ghaderian S. M. and Schat, H. (2013) The effect of EDDS and citrate on the uptake of lead in hydroponically grown *Matthiola flavida*. *Chemosphere* 93: 986-989.
- Najafi, F., Khavari-Nejad, R. A. and Siah Ali, M. (2010) The effects of salt stress on certain physiological parameters in summer savory (*Satureja hortensis* L.) Plants. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry* 6: 13-21.
- Ozturk, L., Demir, Y., Unlukara, A., Karatas, I., Kurunc, A. and Duzdemir, O. (2012) Effects of long-term salt stress on antioxidant system, chlorophyll and proline contents in pea leaves. *Romanian Biotechnological Letters* 17: 7227-7236.
- Paquine . R. Lechasseur, P. (1979) Observation sur une methode de dosage de la proline libre dans les extraite de plantes. *Canadian Journal of Botany* 57: 1851-1854.
- Parida, A. K. and Das, A. B. (2005) Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60: 324-349.
- Patterson, B. D., MacRae, E. A. and Ferguson, I. B. (1984) Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (IV). *Analytical Biochemistry* 139: 487-492.
- Sadak, M. S. and Dawood, M. G. (2014) Role of ascorbic acid and α tocopherol in alleviating salinity stress on flax plant (*Linum usitatissimum* L.). *Journal of Stress Physiology and Biochemistry* 10: 93-111.
- Sinha S. and Saxena R. (2006) Effect of iron on lipid peroxidation, and enzymatic and non-enzymatic antioxidant and bacoside-A content in medicinal plant *Bacopa monnieri* L. *Chemosphere* 62: 1340-1350.
- Tewari, R. K., Kumar, P., Neetu, and Sharma, P. N. (2005) Signs of oxidative stress in the chlorotic leaves of iron starved plants. *Plant Science* 169: 1037-1045.

- Tuncturk, M., Tuncturk, R., Yildirim, B. and Ciftci, V. (2011) Changes of micronutrients, dry weight and plant development in canola (*Brassica napus* L.) cultivars under salt stress. *African Journal of Biotechnology* 10: 3726-3730.
- Zhani, K., Mariem, B. F., Fardaous, M. and Cherif, H. (2012) Impact of salt stress (NaCl) on growth, chlorophyll content and fluorescence of Tunisian cultivars of chili pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Journal of Stress Physiology and Biochemistry* 8: 236-252.

The effect of different iron concentrations on growth and elements uptake of flax (*Linum usitatissimum* L.) under salinity stress

Soghra Mohammadi¹, Ahmad Mohtadi^{*2}, Mohsen Movahhedi Dehnavi³

^{1, 2} Department of Biology, Faculty of Science, Yasouj University

³ Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University

(Received: 28/01/2018, Accepted: 21/07/2018)

Abstract

Plants need suitable amounts of micronutrients for optimal growth under stress conditions and this increases plant resistance to stress conditions such as salinity. In order to investigate the reaction of flax to iron application under salt stress conditions, a pot experiment was conducted as a factorial based on a completely randomized design with three replications. Salinity was determined by sodium chloride at five levels (0, 50, 100, 150 and 200 mM) and iron with 3 levels (25, 50 and 75 μ M). With increased salinity, the amount of root and shoot sodium increased whereas the amount of potassium in the root and shoot decreased. The root iron concentration increased with increasing salinity up to 100 mM, and then decreased. The shoot iron concentration increased with increasing salinity up to 50 mM and followed by a decreasing trend. With increasing salinity, the amount of proline and leaf soluble sugar increased. At all salinity levels, iron had a significant effect on the amount of proline and soluble sugar. With increasing salinity up to 50 mM, the leaf soluble protein, antioxidant enzymes (peroxidase and superoxide dismutase) increased and then decreased. With increasing salinity, root and shoot dry weight decrease. To reduce the effect of salinity, the use of 50 and 75 μ M iron in nutrient solutions is recommended.

Key words: Potassium, Proline, Sodium, Soluble sugars