نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی
سال یازدهم / شماره اول / بهار ۱۴۰۰

بررسی واکنش‌های فیزیولوژیک و رشدی ریشه چهار رقم گندم نان (*Triticum aestivum* L.) به تنش شوری

وحید اطلسی پاک[1*] و امید بهمنی[2]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳)

چکیده

داشتن سامانه‌های ریشه‌ای توسعه یافته در خاک‌های شور به بهبود جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه کمک کرده و می‌تواند قابلیت تولید گیاه را افزایش دهد. به‌منظور بررسی ویژگی‌های سامانه ریشه‌ای چهار رقم گندم نان متفاوت از لحاظ تحمل به شوری (ارگ، افق، تجن و مروارید)، آزمایشی گلخانه‌ای با دو سطح شوری (صفر و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) در لوله‌های پی وی سی انجام شد. شوری طول ریشه‌های اصلی، مجموع طول ریشه، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی را کاهش داد و موجب افزایش سدیم اندام هوایی، دمای برگ و مقدار کلروفیل در مقایسه با شاهد شد. طول ریشه‌های اصلی تحت شرایط شوری در ارقام متحمل (ارگ و افق) بیشتر از ارقام حساس بود. مجموع طول ریشه در رقم افق در پاسخ به تنش شوری بیشتر از بقیه ارقام بود و رقم ارگ بیشترین کاهش (۶۴٪) را نشان داد اما مقدار اندازه‌گیری شده این صفت در همه ارقام تحت تنش شوری برابر بود. اثرات زیانبار شوری بر وزن خشک اندام هوایی در ارقام متحمل (۱۶٪) و حساس (۱۸٪) تقریباً مشابه بود. هر چند در شرایط شوری دمای برگ و مقدار کلروفیل ارقام تفاوت معنی‌داری از خود نشان ندادند، اما تغییرات آنها تحت این شرایط نسبت به شاهد متفاوت بود. نتایج نشان داد که در این آزمایش کاهش رشد اولیه ریشه‌ها بیشتر به‌دلیل اثرات اسمزی املاح در اطراف ریشه‌ها بوده و در ارقام متحمل و حساس تقریباً مشابه است. بنابراین با توجه به اثرات تنش شوری بر ویژگی‌های سامانه ریشه‌ای و پاسخ‌های رشدی ریشه به شوری، می‌توان از آن به‌عنوان ملاک مناسبی در انتخاب به‌منظور تحمل به شوری بهره‌گیری کرد. مقایسه پاسخ‌های رشدی ریشه و اندام هوایی به تنش شوری نشان داد که در شرایط شوری تنظیم جذب آب و عناصر غذایی توسط ریشه‌ها می‌تواند از اهمیت بیشتری نسبت به تنظیم هدایت روزنه‌ای در تحمل صدمات ناشی از شوری برخوردار باشد.

واژه‌های کلیدی: سامانه ریشه‌ای، اثرات اسمزی، دمای برگ، تحمل شوری

۱. استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور
۲. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: v.atlassi@gmail.com

مقدمه

شوری خاک و کم آبی از مهم‌ترین عوامل کاهش تولید در غلات بوده و به‌طور معنی‌داری بر پایداری کشاورزی تأثیر می‌گذارند (۴۲). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، خاک دائم در معرض شوری قرار داشته و شوری آب و یا برخی شیوه‌های آبیاری موجب افزایش شوری خاک می‌شود (۳۰). افزایش املاح خاک موجب کاهش پتانسیل اسمزی آن شده و جذب سدیم توسط ریشه‌ها را افزایش می‌دهد، بنابراین فعالیت‌های متابولیکی گیاه تحت تأثیر قرار گرفته و راندمان فتوسنتز کاهش می‌یابد (۱۲) و این فرایندها موجب کاهش رشد و عملکرد غلات می‌شود (۲۸). بهبود تحمل به شوری در غلات می‌تواند عملکرد را در خاک‌های شور افزایش دهد که لازمه آن آگاهی از مکانیسم‌های تحمل به شوری و چگونگی اثرات زیانبار شوری بر رشد اندام هوایی و ریشه در گیاه است (۲۷ و ۳۹). برخی ویژگی‌هایی که موجب تحمل به شوری در گندم می‌شوند مورد بررسی قرار گرفته و صفات فیزیولوژیکی متعددی که موجب بهبود عملکرد می‌شوند شناسایی شده‌اند (۴۸). درحالی که صفات فیزیولوژیکی متعددی در اندام هوایی مورد شناسایی قرار گرفته و می‌تواند به‌عنوان ملاک تحمل به شوری در برنامه‌های اصلاحی مورد توجه قرار گیرد، به‌دلیل وجود محدودیت در بررسی رشد ریشه و کارکرد آن، مشکلات اندازه‌گیری ویژگی‌های ریشه و نبود روش‌های کارآمد در غربالگری ریشه، اطلاعات در زمینه واکنش آن به تنش شوری ناچیز است. در بیشتر مطالعات علاوه بر اینکه پارامترهای ریشه مورد توجه قرار نگرفته است، بررسی‌ها نیز به مراحل اولیه رشد مانند مرحله گیاهچه‌ای و جوانه‌زنی محدود می‌شود (۳۹).

غلظت‌های بالای نمک در خاک، رشد ریشه را محدود کرده و مانع از جذب آب توسط گیاه می‌شود (۴۸). از اثرات مهم شوری بر گیاه جلوگیری از نفوذ عمقی ریشه، ممانعت از جذب آب توسط ریشه، کاهش رشد و عملکرد دانه است (۱۶). با وجود تحمل به‌نسبت بالای ریشه‌ها به تنش شوری کاهش صفاتی مانند ماده خشک ریشه، قطر ریشه‌ها، طول ریشه، حجم ریشه و تولید ریشه‌های جانبی در گندم تحت تنش شوری ملاحظه شده است (۳۹). تنش اسمزی حاصل از شوری نتیجه کاهش پتانسیل آب در اطراف ریشه است که منجر به کاهش آب سلول، کاهش آماس، ممانعت از تقسیم و گسترش سلول، ممانعت از انجام فتوسنتز و درنهایت کاهش رشد می‌شود (۲۸). با وجود تنوع ژنتیکی بالا در مکانیسم‌های دفع سدیم در گندم، تحمل به تنش اسمزی دارای تنوع ژنتیکی پایینی است (۱۸). رشد ریشه در برخی گونه‌های زراعی دارای تحمل بالایی نسبت به تنش‌های اسمزی است و در واکنش به افزایش املاح نسبت به اندام هوایی کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۴۶). خصوصیات ریشه در تحمل به تنش اسمزی در محیط‌های شور مهم بوده (۴۱) و معماری مطلوب سامانه ریشه‌ای در رشد و تولید گیاهان زراعی بسیار مؤثر است (۴۵). بنابراین ریشه گیاه در مواجهه با تنش شوری می‌تواند نقش مهمی در ثبات رشد و عملکرد داشته باشد (۲۳). در شرایط شوری خاک، سیستم ریشه‌ای عمیق می‌تواند رطوبت را از اعماق خاک جذب کرده و از این طریق به تنش اسمزی حاصل از املاح غلبه کند (۴۱). زمان رویارویی گیاه با تنش‌های اسمزی، برای جلوگیری از تلفات آبی روزنه‌ها بسته می‌شود، اما به‌منظور غلبه بر تنش اسمزی در برخی شرایط محیطی ریشه‌ها نیز می‌توانند نقش مهمی در اجتناب از تنش اسمزی ایفا کنند (۱). نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که تحت شرایط تنش اسمزی ارتباط مطلوبی بین ظرفیت جذب آب توسط ریشه و وزن خشک اندام هوایی در ارقام برنج وجود دارد (۲۵). به‌هر حال اثرات تنش اسمزی در کاهش رشد بیشتر از اثرات ناشی از سمیت یونی حاصل از املاح است (۲۸). مقایسه ارقام گندم تحت شرایط شوری نشان داده است که کاهش مقدار کلروفیل، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، طول ریشه و نیز افزایش دمای برگ می‌تواند به‌دلیل اثرات اسمزی و یا سمیت ناشی از سدیم باشد (۱۸، ۳۷، ۴۲ و ۴۳). با شروع تنش اسمزی روزنه‌های برگ شروع به بستن می‌کند زیرا تنش اسمزی بلافاصله توسط ریشه‌ها درک شده و با ارسال پیام موجب بسته شدن روزنه‌ها می‌شود (۱۸). در این

شرایط عوامل روزنه‌ای فتوسنتز نسبت به عوامل غیرروزنه‌ای حساسیت بیشتری به تنش اسمزی داشته و در کاهش رشد اهمیت بیشتری خواهند داشت (۲). همان‌طور که گفته شد در این شرایط تغییر معماری سامانه ریشه می‌تواند با جذب رطوبت از اعماق خاک شرایط جذب رطوبتی ریشه‌ها را بهبود داده و تا حدی بر تنش اسمزی غلبه کند. هدف از انجام این پژوهش بررسی واکنش سیستم ریشه‌ای و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک اندام هوایی ارقام متفاوت از لحاظ تحمل به شوری در گندم تحت شرایط شوری است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار در سال ۱۳۹۷ در گلخانه پژوهشی گروه کشاورزی دانشگاه پیام نور مرکز همدان در شهر همدان انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار رقم گندم نان ارگ، افق (متحمل به شوری)، تجن و مروارید (حساس به شوری) و دو سطح شوری صفر و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بود. بستر کاشت حاوی مخلوطی از خاک با بافت لومی شنی (۶۰ درصد)، ماسه (۳۰ درصد) و کود دامی (۱۰ درصد) بود. واحدهای آزمایشی شامل گلدان‌هایی از جنس PVC و به‌شکل استوانه‌ای با قطر حدود ۱۰ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر بود. گیاهچه‌ها در دمای ۲±۲۵ و ۲±۱۵ درجه سانتی‌گراد (به‌ترتیب شب و روز) در گلخانه نگهداری شدند. پس از جوانه‌زنی بوته‌ها تنک شدند تا درنهایت در هر گلدان یک بوته باقی بماند. هر واحد آزمایشی شامل ۱۰ گلدان بود. پس از ظهور برگ دوم تیمار شوری اعمال شد. برای ایجاد غلظت یکنواخت شوری در خاک، لوله‌های پی وی سی روزانه به‌مدت ۱۵ دقیقه درون ظرف‌های محتوای محلول مورد نظر به‌صورت شناور قرار داده شدند تا محلول به‌طور کامل از راه روزنه‌ها به درون لوله‌های پی وی سی نفوذ کند. این کار تا زمان نمونه‌برداری ادامه یافت. سه هفته پس از اعمال شوری برخی پارامترها مثل وزن خشک اندام هوایی و ریشه، مقدار کلروفیل، طول ریشه‌های فرعی و اصلی و مقدار سدیم و پتاسیم اندام هوایی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. دمای برگ پنج روز پس از اعمال شوری مورد بررسی قرار گرفت (۴۳). دمای برگ توسط دماسنج مادون قرمز مدل KIMO-KIRAY 300 (ساخت فرانسه) اندازه‌گیری شد، به این ترتیب که از اندام هوایی هر بوته به‌طور متوسط دمای برگ از ۲۰ نقطه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (۱۴ و ۲۰). به‌منظور اندازه‌گیری وزن خشک ریشه و اندام هوایی بوته‌ها پس از تفکیک به اندام هوایی و ریشه با آب مقطر مورد شستشو قرار گرفت و به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند. سپس وزن خشک آنها با ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد. جداسازی ریشه‌ها از خاک از طریق اشباع کردن خاک به‌همراه ریشه در آب و شستشوی ریشه‌ها با آب صورت گرفت. طول محور اصلی ریشه‌ها با خط‌کش اندازه‌گیری شد. مجموع طول ریشه‌های اصلی و فرعی از طریق روش نیومن (۳۳) به‌دست آمد. در این روش ابتدا ظرفی با ابعاد مشخص درنظر گرفته می‌شود و ریشه‌ها پس از شستشو در آن قرار می‌گیرند. ظرف مورد استفاده یک ظرف کم عمق، شفاف با سطح تخت بوده که به‌همراه یک بینوکولار برای شمارش محل‌های تقاطع ریشه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از احتساب تعداد تقاطع بین ریشه‌ها و مجموع طول محورهای اصلی ریشه طبق فرمول زیر طول کل ریشه‌ها به‌دست می‌آید:

$$R=\pi NA/2H$$

که در این فرمول R: مجموع طول ریشه‌ها، N: تعداد تقاطع بین ریشه‌ها با محور اصلی، A: مساحت ظرف مورد استفاده و H: مجموع طول محورهای اصلی ریشه است. کلروفیل با استفاده از استون ۸۰ درصد استخراج شده و با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد (۱۷). سدیم و پتاسیم با استفاده از روش اسید استیک ۰/۱ نرمال استخراج شدند. در این روش ابتدا ۰/۱ گرم نمونه آسیاب شده را درون فالکون ریخته و ۱۰ میلی‌لیتر اسید استیک ۰/۱ نرمال به آن اضافه کرده و در محیط آزمایشگاه به‌مدت ۲۴ ساعت به حالت سکون قرار داده شد. پس از عبور دادن نمونه‌ها از کاغذ صافی با دستگاه نشر شعله‌ای

(Jenway-PFP7) قرائت شد (۴). محاسبات آماری توسط نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شده و میانگین‌ها با آزمون LSD مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

نتایج

نتایج آزمایش نشان داد که شوری ۱۵۰ میلی‌مولار طول ریشه‌های اصلی، مجموع طول ریشه‌ها، دمای برگ، کلروفیل (a+b)، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، سدیم و پتاسیم اندام هوایی و نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی را تحت تأثیر قرار داد. ارقام مختلف از نظر مجموع طول ریشه‌ها، وزن خشک ریشه و نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی اختلاف معنی‌دار نداشتند. تأثیر برهم‌کنش رقم و شوری بر صفات طول ریشه‌های اصلی، مجموع طول ریشه‌ها، دمای برگ و سدیم و پتاسیم اندام هوایی معنی‌دار شد (جدول ۱) و نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مقدار کلروفیل در شوری ۱۵۰ میلی‌مولار بیشتر از شرایط بدون شوری بود (جدول ۲).

بیست و یک روز پس از اعمال شوری طول ریشه‌های اصلی در رقم ارگ کاهش معنی‌داری از خود نشان نداد درصورتی که ارقام افق، تجن و مروارید به‌ترتیب کاهش معنی‌داری به مقدار ۴۹، ۶۳ و ۴۴ درصد از این نظر از داشتند. شوری مجموع طول ریشه‌های اصلی و فرعی را نسبت به شاهد کاهش داد و با وجود اینکه در شرایط شاهد رقم ارگ نسبت به ارقام دیگر بیشترین مقدار را داشت، اما بر خلاف انتظار تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار موجب بیشترین کاهش (۶۴٪) در مجموع طول ریشه‌ها در این رقم نسبت به ارقام دیگر شد. رقم افق از نظر مجموع طول ریشه‌ها کمترین کاهش (۳۳٪) را داشته و ارقام حساس تجن و مروارید به‌ترتیب ۴۹ و ۵۵ درصد کاهش از خود نشان دادند (جدول ۳). هر چند رقم ارگ نسبت به سه رقم دیگر تحت تأثیر شوری دارای بیشترین کاهش از نظر مجموع طول ریشه‌ها بود اما بین ارقام در این شرایط اختلافی ملاحظه نشد. طول ریشه‌های اصلی نیز در ارقام افق، تجن و مروارید تحت شرایط شوری اختلاف معنی‌داری نداشت. طول ریشه‌های اصلی هم در شرایط شاهد و هم در شرایط شوری در ارقام متحمل بیشتر از ارقام حساس بود هر چند اختلاف بین افق با تجن و مروارید تحت شرایط شوری معنی‌دار نشد (جدول ۳). شوری موجب کاهش وزن خشک اندام هوایی شد. رقم مروارید و افق در شرایط شاهد دارای بیشترین وزن خشک اندام هوایی بودند و در شرایط شوری بیشترین کاهش را از خود (به‌ترتیب به مقدار ۳۴ و ۲۰ درصد) نشان دادند. در شرایط شوری در ارقام متحمل و حساس وزن خشک اندام هوایی به‌طور متوسط به‌ترتیب ۱۶ و ۱۸ درصد کاهش یافت. در ارقام ارگ و تجن تحت شرایط شوری کاهش معنی‌داری در وزن خشک اندام هوایی مشاهده نشد (جدول ۴).

نتایج نشان داد در شرایط شوری، وزن خشک ریشه هر چهار رقم مورد آزمایش کاهش یافت. رقم ارگ و مروارید بیشترین کاهش را تحت شرایط شوری به‌ترتیب به مقدار ۶۳ و ۶۲ درصد از خود نشان دادند. متوسط کاهش وزن خشک ریشه در ارقام متحمل و حساس به شوری به‌ترتیب ۵۲ و ۵۴ درصد بود. تفاوت بین وزن خشک ریشه هر چهار رقم در شرایط شوری غیرمعنی‌دار بود (جدول ۳). در شرایط بدون شوری دمای برگ در رقم ارگ کمتر از ارقام دیگر بود و در ارقام افق، تجن و مروارید در این شرایط تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد، هر چند اختلاف افق با تجن معنی‌دار بود. شوری موجب افزایش معنی‌دار دمای برگ در هر چهار رقم شد. بیشترین افزایش دما در رقم ارگ به مقدار ۵۴ درصد و کمترین افزایش در رقم تجن به مقدار ۱۰ درصد مشاهده شد. تفاوت دمای برگ ارقام در شرایط شوری غیرمعنی‌دار و دمای برگ رقم ارگ در این شرایط بر خلاف انتظار دارای افزایش بیشتری نسبت به ارقام تجن و مروارید بود (جدول ۳).

مقدار کلروفیل کل تحت شرایط شوری افزایش یافت و این افزایش در همه ارقام معنی‌دار بود (جدول ۳). هر چند در شرایط بدون شوری مقدار کلروفیل ارقام اختلاف معنی‌داری نداشت، اما افزایش کلروفیل تحت شرایط شوری در ارقام تجن

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس مقادیر صفات اندازه‌گیری شده در ارقام مختلف گندم تحت تیمارهای شوری

منابع تغییرات	درجه آزادی	طول محور اصلی ریشه‌ها	طول ریشه‌های اصلی و فرعی	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	دمای برگ	کلروفیل (a+b)	سدیم اندام هوایی	پتاسیم اندام هوایی	نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی
شوری(S)	۱	۱۳۵۰۵**	۳۷۹۲۳۹۵**	۰/۰۷**	۰/۰۳**	۲۳۰**	۱۴**	۱۳۷۷۵۱۱**	۱۵۶۹۴۱**	۱۸۹**
رقم (C)	۳	۴۹۱۸**	۲۷۵۹۸ ns	۰/۰۳**	۰/۰۰۰۵ns	۱۰**	۱/۲**	۲۳۳۵۱**	۲۷۴۰**	۰/۰۷ns
S×C	۳	۱۳۳۴**	۱۴۵۱۴۹**	۰/۰۱ns	۰/۰۰۱ ns	۲۲**	۰/۱۷ns	۲۰۹۶۲*	۹۱۸۴**	۰/۰۹ns
خطا	۲۴	۲۵۱	۲۵۷۱۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۴	۰/۸۵	۰/۲۱	۴۹۹۵	۴۲۲	۰/۷۶
ضریب تغییرات (CV%)		۱۸/۱	۱۵/۹	۱۶/۹	۲۰	۳/۵	۱۵/۸	۲۳	۴/۹	۲۷

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و غیرمعنی‌دار

جدول ۲. مقایسه میانگین اثرات سطوح مختلف شوری و رقم بر صفات مورد مطالعه

تیمار	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی	کلروفیل کل (میلی‌گرم بر گرم ماده تر)
	(گرم در گیاه)			
شوری				
صفر	۰/۵۱a	۰/۱۳a	۵/۵a	۲/۲b
۱۵۰	۰/۴۲b	۰/۰۶b	۰/۷۲b	۳/۶a
رقم				
ارگ	۰/۴۰c	۰/۱۱a	۳/۰۴a	۳/۱۲a
افق	۰/۵۵a	۰/۰۹a	۳/۲۰a	۳/۳۷a
تجن	۰/۴۱bc	۰/۱۰a	۳/۲۶a	۲/۵۴b
مروارید	۰/۴۹ab	۰/۰۹a	۳/۱۱a	۲/۶۳b

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون در هر تیمار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

و مروارید به‌ترتیب ۷۷ و ۱۰۵ درصد و در ارقام ارگ و افق به‌ترتیب ۵۸ و ۳۵ درصد بود. شوری ۱۵۰ میلی‌مولار موجب افزایش سدیم اندام هوایی شد. مقدار سدیم تحت شرایط شاهد در همه ارقام مشابه بود و در شرایط شوری نیز اختلاف بین ارقام ارگ، افق و مروارید از این نظر غیرمعنی‌دار بود اما در این شرایط در رقم تجن کمترین مقدار تجمع سدیم اندام هوایی نسبت به ارقام دیگر ملاحظه شد (جدول ۳).

مقدار پتاسیم اندام هوایی تحت تأثیر شوری کاهش یافت. رقم ارگ تحت شرایط شاهد دارای بالاترین مقدار پتاسیم اندام هوایی بود اما در شرایط شوری بیشترین کاهش را به مقدار ۴۱ درصد از خود نشان داد. تحت شرایط شوری بیشترین مقدار پتاسیم اندام هوایی مربوط به رقم مروارید بود و سه رقم دیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۴). ارقام ارگ، افق، تجن و مروارید به‌ترتیب ۴۱، ۳۱، ۲۹ و ۱۶ درصد تحت شرایط شوری کاهش پتاسیم نسبت به شاهد داشتند (جدول ۴). شوری موجب کاهش نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی شد (جدول ۲). این نسبت در شرایط شوری و شاهد در ارقام مختلف مشابه بود. مقدار کاهش نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی تحت تأثیر شوری در ارقام ارگ، افق، تجن و مروارید به‌ترتیب ۹۰، ۸۹، ۸۳ و ۸۷ درصد بود (جدول ۴) و این صفت در بین صفات مختلف بیشترین پاسخ را به تنش شوری از خود نشان داد.

بحث

با وجود اینکه طول ریشه‌های اصلی در رقم ارگ تحت شرایط شوری بدون تغییر بود اما بیشترین کاهش در مجموع طول ریشه‌های اصلی و فرعی در این رقم ملاحظه شد. به‌نظر می‌رسد تحت تنش شوری ریشه‌های فرعی در رقم ارگ کاهش قابل ملاحظه و معنی‌داری داشتند. شوری ۱۵۰ میلی‌مولار در گندم غلظت مناسبی برای بررسی خصوصیات رشدی ریشه گندم در ژنوتیپ‌های مختلف است (۳۸). طول ریشه‌های اصلی در رقم تجن بیشترین پاسخ را به تنش شوری نشان داد و با توجه به عدم واکنش رقم ارگ از این نظر می‌توان حفظ ریشه‌های اصلی را پاسخی در جهت غلبه بر تغییر شرایط اسمزی عنوان کرد. گیاهان دارای ریشه اصلی طویل‌تر و شمار ریشه‌های جانبی بیشتر تحمل بالاتری به شوری دارند (۳۸ و ۴۱). برخی پژوهشگران در ارقام گندم (۳۸) و جو (۴۱) کاهش کمتر طول ریشه‌های اصلی را در ارقام متحمل گزارش کرده‌اند. پس از اعمال شوری بلافاصله تنش اسمزی موجب کاهش گسترش سلول‌های نوک ریشه و کاهش طول ریشه‌های اصلی و انشعابات فرعی می‌شود (۲۸). پژوهش‌های متعدد نشان داده است کاربرد PEG (پلی‌اتیلن گلیکول)، مانیتول (زمانی که اثرات اسمزی مشابهی اعمال کرده است) و کلرید سدیم اثرات مشابهی در کاهش رشد ریشه داشته است

جدول ۳. مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده در چهار رقم گندم سه هفته پس از اعمال شوری

رقم	شوری (میلی مولار)	طول محور اصلی ریشه‌ها (سانتی متر)	شاهد (درصد)	طول ریشه‌های اصلی و فرعی (سانتی متر)	شاهد (درصد)	وزن خشک اندام هوایی (گرم در گیاه)	شاهد (درصد)	وزن خشک ریشه(گرم در گیاه)	شاهد (درصد)	دمای برگ (درجه سانتی گراد)	شاهد (درصد)	کلروفیل(میلی گرم بر گرم ماده تر)	شاهد (درصد)	سدیم اندام هوایی(میکرومول بر گرم ماده خشک)	شاهد (درصد)
ارگ	صفر	۱۲۶^{a}	۱۰۰	۱۶۰۱^{a}	۱۰۰	۰/۴۳^{c}	۱۰۰	۰/۱۶^{a}	۱۰۰	۱۸/۸^{d}	۱۰۰	۲/۴^{cd}	۱۰۰	۱۰۱^{c}	۱۰۰
	۱۵۰	۱۲۰^{a}	۹۵	۵۸۰^{c}	۳۶	۰/۳۸^{c}	۸۸	۰/۰۶^{c}	۳۷	۲۹^{a}	۱۵۴	۳/۸^{a}	۱۵۸	۵۸۸^{a}	۵۸۲
افق	صفر	۱۱۱^{a}	۱۰۰	۱۱۵۶^{b}	۱۰۰	۰/۶۱^{a}	۱۰۰	۰/۱۲^{b}	۱۰۰	۲۳/۵^{c}	۱۰۰	۲/۸^{cd}	۱۰۰	۸۱^{c}	۱۰۰
	۱۵۰	۵۷^{c}	۵۱	۷۸۲^{c}	۶۷	۰/۴۹^{bc}	۸۰	۰/۰۷^{c}	۵۸	۲۸/۷^{a}	۱۲۲	۳/۸^{a}	۱۳۵	۵۰۵^{a}	۶۲۳
تجن	صفر	۱۰۵^{ab}	۱۰۰	۱۲۷۸^{b}	۱۰۰	۰/۴۲^{c}	۱۰۰	۰/۱۳^{ab}	۱۰۰	۲۵/۳^{b}	۱۰۰	۱/۸^{d}	۱۰۰	۸۹^{c}	۱۰۰
	۱۵۰	۳۹^{c}	۳۷	۶۶۳^{c}	۵۱	۰/۴۱^{c}	۹۷	۰/۰۷^{c}	۵۳	۲۷/۸^{a}	۱۰۹	۳/۲^{ab}	۱۷۷	۳۵۷^{b}	۴۰۱
مروارید	صفر	۸۸^{b}	۱۰۰	۱۳۵۴^{b}	۱۰۰	۰/۵۹^{ab}	۱۰۰	۰/۱۳^{ab}	۱۰۰	۲۴/۱^{bc}	۱۰۰	۱/۷^{d}	۱۰۰	۸۸^{c}	۱۰۰
	۱۵۰	۵۰^{c}	۵۶	۶۱۰^{c}	۴۵	۰/۳۹^{c}	۶۶	۰/۰۵^{c}	۳۸	۲۷/۸^{a}	۱۱۵	۳/۵^{ab}	۲۰۵	۵۷۰^{a}	۶۴۷

برای هر صفت میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۴. مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده در ارقام مختلف گندم سه هفته پس از اعمال شوری

رقم	شوری (میلی‌مولار)	پتاسیم اندام هوایی (میکرو مول بر گرم ماده خشک)	شاهد (درصد)	نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی	شاهد (درصد)
ارگ	صفر	۵۴۸[a]	۱۰۰	۵/۵[a]	۱۰۰
	۱۵۰	۳۲۳[d]	۵۹	۰/۵۵[b]	۱۰
افق	صفر	۴۶۳[b]	۱۰۰	۵/۷[a]	۱۰۰
	۱۵۰	۳۲۲[d]	۶۹	۰/۶۵[b]	۱۱
تجن	صفر	۴۷۳[b]	۱۰۰	۵/۵[a]	۱۰۰
	۱۵۰	۳۳۹[d]	۷۱	۰/۹۵[b]	۱۷
مروارید	صفر	۴۴۹[b]	۱۰۰	۵/۵[a]	۱۰۰
	۱۵۰	۳۸۹[c]	۸۶	۰/۷۲[b]	۱۳

برای هر صفت میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

که این موضوع نشان‌دهنده اثرات اسمزی شوری بر رشد ریشه در ابتدای رشد است (۳۲، ۴۴ و ۴۷). دلیل کاهش رشد طولی ریشه‌ها در اثر تنش اسمزی، کاهش تعداد و طول ریشه‌های اصلی عنوان شده است (۲۳) و نتایج آزمایش‌ها مشخص کرده است که تحت تیمار شوری کاهش پنجه‌ها در گندم موجب کاهش تعداد ریشه‌های اصلی شده و درنتیجه آن ریشه‌های فرعی نیز کاهش می‌یابد (۲۷). کاهش پنجه‌ها در همه ارقام مورد آزمایش تحت تیمار شوری تأییدی بر این موضوع است (داده‌ها گزارش نشده است). تنش اسمزی حاصل از شوری در مدت زمان کوتاهی موجب کاهش رشد طولی ریشه و هدایت روزنه‌ای برگ‌ها می‌شود و پژوهش‌ها نشان داده است که عامل عمده آن پیام‌های هورمونی است (۲۷ و ۲۸). کاهش فتوسنتز اندکی بعد از اعمال شوری به‌دلیل عوامل روزنه‌ای اتفاق می‌افتد زیرا تنش اسمزی موجب کاهش هدایت روزنه‌ای شده و عدم تغییر و گاهی افزایش مقدار کلروفیل را به‌همراه خواهد داشت (۲۷ و ۴۱) که این امر در ارقام مورد بررسی در این آزمایش مشاهده می‌شود. تحت شرایط شوری اندازه سلول‌ها و برگ‌ها کاهش می‌یابد و تراکم کلروپلاست در واحد سطح برگ افزایش یافته که می‌تواند منجر به افزایش کلروفیل در واحد سطح برگ شود (۱۱). همبستگی منفی و معنی‌دار بین دمای برگ و مقدار کلروفیل با طول ریشه‌های اصلی و مجموع طول ریشه‌ها (جدول ۵) مؤید این موضوع است. ارقام گندم و جو متحمل به شوری و تنش کم آبی دارای طول ریشه و وزن خشک بیشتر، تراکم ریشه بالاتر و سطح ریشه بیشتری هستند (۲۳، ۳۸ و ۴۱). بالا بودن طول ریشه‌های اصلی در رقم ارگ نسبت به ارقام دیگر تحت شرایط شوری، موجب اجتناب این رقم از تنش‌های اسمزی در مراحل اولیه رشد می‌شود. با توجه به این موضوع و کاهش قابل ملاحظه طول ریشه‌های اصلی در رقم تجن تحت شرایط شوری به‌نظر می‌رسد طول ریشه‌های اصلی می‌تواند تحمل تنش اسمزی را افزایش داده و این موضوع در برخی مطالعات (۳۴) مورد نظر قرار گرفته است. کاهش کمتر مجموع طول ریشه‌های اصلی و فرعی در رقم افق نشان داد که این رقم با توجه به طول کمتر ریشه‌های اصلی و فرعی در شرایط شاهد، انشعابات فرعی را در شرایط شوری بیشتر از ارقام دیگر حفظ کرد. حفظ انشعابات فرعی ریشه‌ها و گاهی القای انشعاب‌زنی تحت شرایط شوری (۳۸) برای تحمل تنش اسمزی حاصل از شوری در برخی ارقام گندم مشاهده شده است. تفاوت‌های قابل توجهی بین خصوصیات ریشه ارقام مختلف گندم در مراحل اولیه رشد تحت شرایط شوری ملاحظه شده است (۱ و ۳۸) که علت آن را اثرهای

جدول ۵. ضرایب همبستگی صفات مورد بررسی ارقام گندم در شرایط شوری

ردیف	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	طول ریشه‌های اصلی و فرعی	طول محور اصلی ریشه	دمای برگ	سدیم اندام هوایی	پتاسیم اندام هوایی	نسبت پتاسیم به سدیم	کلروفیل
۱	۱								
۲	۰/۳۰^{ns}	۱							
۳	۰/۳۶*	۰/۸۹	۱						
۴	۰/۱۳^{ns}	۰/۵۲**	۰/۴۹**	۱					
۵	−۰/۲۶^{ns}	−۰/۸۱**	−۰/۸۷**	−۰/۵۳**	۱				
۶	−۰/۳۶*	−۰/۷۶**	−۰/۸۰**	−۰/۴۰*	۰/۷۴**	۱			
۷	۰/۲۱^{ns}	۰/۷۸**	۰/۸۴**	۰/۵۰**	−۰/۹۰**	−۰/۷۷**	۱		
۸	۰/۳۰^{ns}	۰/۷۷**	۰/۷۹**	۰/۵۳**	−۰/۷۵**	−۰/۹۱**	۰/۸۴**	۱	
۹	−۰/۲۶^{ns}	−۰/۶۷**	−۰/۷۱**	−۰/۳۵*	۰/۵۵**	۰/۷۴**	−۰/۶۷**	−۰/۷۴**	۱

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و غیرمعنی‌دار

اسمزی ناشی از شوری می‌دانند (۲۴). در این آزمایش نیز تفاوت بین پاسخ‌های ریشه ارقام مختلف به تنش شوری مشهود بود.

وزن خشک اندام هوایی در ارقام افق و مروارید که در شرایط شاهد دارای بیشترین مقدار بودند کاهش معنی‌دار داشت. مقایسه درصد کاهش وزن خشک اندام هوایی در ارقام متحمل و حساس و مقایسه غلظت‌های سدیم اندام هوایی این ارقام تحت شرایط شوری نشان داد که وزن خشک اندام هوایی بیشتر به‌دلیل اثرات اسمزی شوری کاهش یافته است. در آزمایش‌های متعدد کاهش وزن خشک اندام هوایی در سطوح متوسط و بالای شوری به اثرات اسمزی شوری نسبت داده می‌شود (۱۸ و ۴۱) و مشخص شده است که شوری می‌تواند سبب ایجاد تفاوت‌های ژنتیکی بدون ایجاد سمیت یونی در خصوصیات اندام هوایی شود (۳۶). افزایش قابل ملاحظه سدیم اندام هوایی در رقم تجن و کاهش ۳ درصدی وزن خشک اندام هوایی تحت شرایط شوری تأییدی بر این موضوع است که سهم اثرات ویژه یونی در پاسخ گیاه به شوری می‌تواند بسیار ناچیز باشد. کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی در دو رقم افق و مروارید با افزایش دمای برگ همراه است و این افزایش دما که نتیجه کاهش هدایت روزنه‌ای برگ‌ها است (۲۰) سبب کاهش فتوسنتز و درنتیجه کاهش وزن خشک اندام هوایی می‌شود. برخی نتایج روی گیاه گندم نشان داده است که تنوع ژنتیکی در رشد ارقام مختلف تحت شرایط تنش اسمزی حاصل از شوری پایین است (۲۶) درصورتی که نتایج برخی از آزمایش‌ها وجود تنوع ژنتیکی را تحت این شرایط تأیید کرده‌اند (۱۸). در این آزمایش احتمالاً مدت زمان تنش شوری به اندازه‌ای نبوده است که منجر به بروز اثرات ویژه یونی شود، زیرا مدت زمان تنش در بروز اثرات ویژه یونی بسیار مؤثر است (۳ و ۲۸). به هر جهت هدایت روزنه‌ای مهم‌ترین عامل محدود کننده فتوسنتز به‌خصوص در مراحل اولیه رشد است و میزان

اسیمیلاسیون Co_2 با هدایت روزنه‌ای مرتبط بوده و تفاوت‌های ژنتیکی در تولید ماده خشک برآوردی از تفاوت در سرعت جذب خالص کربن است و برابر نتایج پژوهشگران تنوع ژنتیکی در تحمل اسمزی در گندم وجود داشته و اثرات سمیت یونی از آن قابل تفکیک است (۱۸). در برخی شرایط محیطی برای غلبه بر آسیب تنش، تنظیم جذب آب به‌وسیله ریشه‌ها بسیار مهم تر از تنظیم تعرق برگ است و بهبود ظرفیت جذب آب ریشه در مقایسه با بسته شدن روزنه‌ها نقش مهم‌تری در اجتناب از کاهش رشد ایفا می کند (۱). نتایج نشان داد وزن خشک ریشه به مقدار قابل توجهی در همه ارقام کاهش یافت و این کاهش در رقم ارگ و مروارید بیشتر از ارقام افق و تجن بود. به‌نظر می‌رسد کاهش وزن خشک ریشه در رقم ارگ به‌دلیل کاهش بیشتر طول ریشه‌های اصلی و فرعی در مقایسه با ارقام دیگر باشد. ضمن کاهش کمتر طول ریشه‌های اصلی و فرعی وزن خشک ریشه در رقم افق کمترین کاهش را نسبت به ارقام دیگر نشان داد. در پژوهش‌های متعددی وزن خشک ریشه ملاک انتخاب برای تحمل به شوری در گندم معرفی شده است (۱ و ۳۸). در این آزمایش وزن خشک ریشه تحت شرایط شوری کاهش بیشتری نسبت به وزن خشک اندام هوایی داشت. بررسی‌های انجام شده روی اثرات شوری بر ریشه گندم نشان داده است که عامل کاهش وزن خشک ریشه تحت سطوح متوسط و بالای شوری بیشتر اثرات اسمزی ناشی از شوری است (۲۷ و ۳۸). درصد بالای کاهش وزن خشک ریشه نسبت به اندام هوایی در این آزمایش نشان می‌دهد که فراهمی اسیمیلات در اندام هوایی عامل کاهش رشد ریشه‌ها نبوده است. کاهش بیشتر وزن خشک ریشه‌ها نسبت به اندام هوایی در شرایط شوری در اوایل رشد در گندم گزارش شده است (۳۸). وزن خشک ریشه ارقام افق و مروارید به‌ترتیب ۹ و ۷ درصد بیشتر از طول ریشه‌های اصلی و فرعی کاهش داشت. با توجه به این موضوع به‌نظر می‌رسد که این ارقام به‌خصوص رقم افق بیشتر از بقیه ارقام قادر به حفظ انشعاب‌زنی یا طویل شدن ریشه‌ها تحت تنش اسمزی بوده است و نتایج نشان داده است که در این شرایط به احتمال زیاد قطر ریشه‌ها کاهش می‌یابد تا به تداوم طویل شدن ریشه‌ها کمک کند (۲۲ و ۴۱). این فرایند گیاه را قادر می‌سازد تا به‌طور فیزیولوژیکی خود را با تنش اسمزی حاصل از شوری در مراحل اولیه رشد سازگار کند. نتایج آزمایش‌ها پیشین نشان داده است که کاهش وزن خشک ریشه در گندم (۱۶) و جو (۴۱) با کاهش طول ریشه‌ها همراه بوده است. عدم همبستگی بین وزن خشک ریشه و اندام هوایی (جدول ۵) در این آزمایش تأیید می‌کند که کاهش وزن خشک ریشه در این آزمایش متأثر از اندام هوایی نبوده و رشد ریشه ارقام در اوایل مرحله رشد بیشتر به‌دلیل اثرات اسمزی محیط اطراف ریشه است. شوری موجب افزایش معنی‌دار دمای برگ همه ارقام مورد مطالعه شد که عامل آن کاهش هدایت روزنه‌ای تحت تأثیر تنش اسمزی حاصل از شوری است. کاهش هدایت روزنه‌ای می‌تواند ناشی از پیام‌های هورمونی یا شیمیایی ارسالی از ریشه‌ها باشد (۱ و ۲۴). استفاده از دمای برگ در تعیین تحمل یا حساسیت به شوری در گیاهان مورد مطالعه قرار گرفته است (۲۰ و ۴۳). تفاوت در دمای برگ در ارقام مختلف مرتبط با هدایت روزنه‌ای برگ‌ها است (۷) و اثرات اسمزی ناشی از سطوح بالای شوری در گندم می‌تواند موجب بروز تنوع ژنتیکی آن شود (۱۴). با وجود اینکه رقم ارگ در شرایط شاهد دارای کمترین دمای برگ بود، اما تحت شرایط شوری بیشترین افزایش را از خود نشان داد.

این موضوع نشان می‌دهد که در برخی ارقام گندم ممکن است میزان هدایت روزنه‌ای در شرایط نرمال عامل تعیین کننده آن در شرایط شوری نباشد همچنان که برخی نتایج در گندم تأیید می‌کند که میزان هدایت روزنه در ارقام گندم تحت شرایط شوری الزاماً تابع مقدار آن در شرایط نرمال نیست (۱۸) اما در ارقام جو هدایت روزنه‌ای بالا تحت شرایط شوری به‌میزان قابل توجهی از مقدار آن در شرایط بدون شوری تبعیت می‌کند (۲۱). نتایج نشان داد که افزایش دمای برگ تحت شرایط شوری موجب کاهش وزن خشک ارقام افق و مروارید شد که هر دو دارای بیشترین مقدار وزن خشک در شرایط شاهد بودند. در

مقایسه ارقام مختلف گندم تحت شرایط شوری تنوع ژنتیکی بالایی از نظر میزان رشد نسبی وجود دارد که عامل مهم آن تفاوت در هدایت روزنه‌ای بیان شده است (۱۳).نتایج نشان داده است که در گندم کاهش وزن خشک ممکن است متناسب با کاهش هدایت روزنه‌ای یا افزایش دمای برگ نباشد، زیرا با ادامه روند شوری تغییرات آناتومیکی در نمو برگ اتفاق می‌افتد که در نتیجه آن اندازه سلول، تراکم روزنه‌ها و غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ تحت تأثیر قرار گرفته و این امر می تواند به تداوم رشد کمک کند (۱۸). همبستگی منفی و معنی‌دار (r=-۰/۸۷**) بین دمای برگ و طول ریشه‌های اصلی و فرعی گویای تأثیر همسوی تنش اسمزی حاصل از شوری بر هدایت روزنه‌ای و طول ریشه‌های اصلی و فرعی در این آزمایش است. به هر جهت عامل اصلی کاهش ماده خشک در ارقام افق و مروارید عوامل روزنه‌ای فتوسنتز تحت شرایط شوری است به‌طوری که نتایج پژوهش‌های پیشین نیز نشان داده است تحت شرایط شوری در گندم مقدار فتوسنتز قبل از کاهش کلروفیل تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۱۹). پیش‌تر نیز مشخص شده است که در سطوح بالای شوری اثرات اسمزی ناشی از املاح می‌تواند با افزایش دما میزان تحمل یا حساسیت در ارقام گندم را تعیین کند (۱۴ و ۲۰).

در شرایط شوری مقدار کلروفیل همه ارقام افزایش یافت و اختلافی بین ارقام از این نظر مشاهده نشد. تحت شرایط تنش اسمزی حاصل از املاح اندازه سلول‌ها و درنتیجه برگ‌ها کاهش می‌یابد و درنهایت تراکم کلروپلاست در واحد سطح برگ در مراحل اولیه تنش شوری افزایش می‌یابد (۱۱). این نتایج نشان می‌دهد که در مراحل اولیه تنش شوری عامل روزنه‌ای نقش مهم‌تری در کاهش فتوسنتز و رشد گیاه در مقایسه با عوامل غیرروزنه‌ای دارد. برخی نتایج نیز عدم تغییر یا تغییرات جزئی کلروفیل در مراحل اولیه رشد گندم تحت شرایط شوری را تأیید می‌کند (۵ و ۱۸). همبستگی مثبت و معنی‌دار (r=-۰/۵۵**) بین دمای برگ و کلروفیل نشان می‌دهد که کاهش هدایت روزنه‌ای برگ‌ها تحت تنش اسمزی با تغییرات آناتومیکی برگ همراه بوده است که می تواند باعث ادامه رشد مطلوب‌تر گیاه در این شرایط می‌شود.

مقایسه مقدار سدیم اندام هوایی در ارقام مختلف نشان داد که تجمع سدیم در رقم تجن نسبت به سه رقم دیگر پایین‌تر بوده و این سه رقم از این نظر تحت شرایط شوری اختلاف معنی‌داری نداشتند. تجمع کمتر سدیم در رقم تجن نسبت به رقم متحمل ارگ در پژوهش‌های دیگر نیز نشان داده شده است (۴ و ۳۵). با وجود تجمع پایین‌تر سدیم در اندام هوایی رقم تجن، حساسیت این رقم نسبت به شوری به تحمل پایین‌تر بافت‌ها نسبت داده شده است (۴). با توجه به مقادیر به نسبت همسان سدیم اندام هوایی در ارقام مروارید و ارگ، درصد کاهش وزن خشک اندام هوایی در آنها متفاوت بود که این موضوع نشان می‌دهد عامل عمده تأثیرگذار بر کاهش وزن خشک اندام هوایی در اوایل دوره رشد در این آزمایش اثرات اسمزی حاصل شوری بوده است که توسط برخی پژوهشگران نیز مورد تأیید قرار گرفته است (۲۸، ۳۱ و ۳۷). افزایش سدیم بافت‌های هوایی در هیچ یک از ارقام موجب کاهش کلروفیل در مراحل اولیه رشد نشد و این موضوع نشان می‌دهد که با وجود اینکه در بیشتر پژوهش‌ها غلظت کمتر سدیم عامل تحمل معرفی شده است (۶ و ۲۸) اما تحمل بافت‌ها نیز به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تحمل به شوری است (۱۵). مشخص شده است که همیشه غلظت پایین سدیم در ارقام گندم نمی‌تواند موجب تحمل به شوری شود و تحمل به شوری علاوه بر تجمع پایین سدیم در بافت‌ها نیاز به دیگر واکنش‌های فیزیولوژیک که مرتبط با تحمل بافت‌هاست دارد (۴ و ۹). گاهی غلظت سدیم اندام هوایی در ارقام متحمل و حساس گندم برابر و گاهی در ارقام متحمل بیشتر بوده است (۹ و ۱۰).

شوری موجب کاهش غلظت پتاسیم اندام هوایی در همه رقم‌ها شد اما کمترین کاهش مربوط به رقم مروارید بود. تحمل به شوری در ارقام گندم با توانایی آن در حفظ مقادیر بیشتر پتاسیم در بافت‌های هوایی مرتبط است (۱۱ و ۳۸). غلظت بالاتر سدیم محیط اطراف ریشه جذب پتاسیم را محدود کرده و

جذب سدیم با پتاسیم رقابت کرده و کاهش جذب آن را در ریشه به‌دنبال دارد (۴۰). وجود همبستگی منفی و معنی‌دار (r=-۰/۷۷**) بین سدیم و پتاسیم اندام هوایی نشان‌دهنده وجود رقابت در جذب سدیم و پتاسیم اندام هوایی در این آزمایش است. حفظ بیشتر مقادیر پتاسیم اندام هوایی و بالا نگه‌داشتن نسبت پتاسیم به سدیم موجب افزایش تحمل گندم نسبت به شوری می‌شود (۲۹). از آنجا که رقم تجن دارای غلظت پایینی از سدیم در اندام هوایی نسبت به ارقام دیگر بود، و همچنین نسبت به ارقام ارگ و افق پتاسیم بیشتری را در اندام هوایی حفظ کرد بنابراین توانست تحت شرایط شوری نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی را به طور مطلوب‌تری حفظ کند، هر چند درنهایت اختلاف آن از این نظر با دیگر ارقام غیرمعنی‌دار شد. رقم مروارید نیز پتاسیم بیشتری نسبت به ارقام دیگر در اندام هوایی تحت شرایط شوری داشت ولی به‌علت تجمع بالای سدیم در اندام هوایی نسبت پتاسیم به سدیم آن تفاوت معنی‌داری با دیگر ارقام نداشت. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که بر خلاف نتایج پژوهش‌های گذشته (۸، ۲۸، ۳۵ و ۴۰) از این صفت نمی‌توان به‌عنوان معیاری به‌منظور تحمل به شوری در همه ارقام بهره‌گیری کرد. این نسبت در سیتوسول سلول‌های بافت‌های هوایی معیار مناسب‌تری برای ارزیابی تحمل به شوری است و بررسی این نسبت در اندام هوایی می‌تواند گمراه کننده باشد چون بخشی از سدیم تجمع یافته در بافت‌های گیاهی می‌تواند در واکوئل ذخیره شود (۹ و ۳۶). با وجود این در آزمایش انجام شده این صفت حساس‌ترین صفت نسبت به تنش شوری بود که دلیل آن نیز به‌هم خوردن تعادل یونی و درنتیجه افزایش غلظت سدیم و کاهش غلظت پتاسیم بافت‌ها تحت تنش شوری است (۲۸).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد رشد طولی و گسترش سامانه ریشه‌ای ارقام گندم در جذب آب و عناصر غذایی تحت شرایط شوری به تحمل شرایط تنش کمک می‌کند. از آنجا که سامانه ریشه‌ای گسترده و طویل موجب تحمل بیشتر شوری می‌شود بنابراین تفاوت در این ویژگی‌ها می‌تواند تفاوت ارقام مختلف در تحمل تنش را آشکار سازد. نتایج نشان داد که در ارقام گندم همیشه پاسخ ریشه و اندام هوایی به شوری متناسب نبوده و ریشه می‌تواند با تنظیم مطلوب‌تر جذب آب و عناصر غذایی در مقایسه با عوامل روزنه‌ای اندام هوایی نقش مهم‌تری در اجتناب از صدمات ناشی از تنش و کاهش رشد داشته باشد. بنابراین با توجه به نقش ریشه در غلبه بر آسیب‌های ناشی از شوری، می‌توان از آن به‌عنوان ملاک تحمل در غربالگری ارقام گندم متحمل به شوری بهره‌گیری کرد. با توجه به اینکه شوری از مهم‌ترین عوامل محدود کننده عملکرد گیاهان زراعی در اراضی شور محسوب می‌شود، توسعه ارقامی از گندم با سیستم ریشه‌ای مطلوب امری ضروری است.

منابع مورد استفاده

1. Aroca, R., R. Porcel and J. M. Ruiz-Lozano. 2012. Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions. *Journal of Experimental Botany* 63: 43-57.
2. Atlassi Pak, V. and O. Bahmani. 2017. Evaluation of ion distribution in different tissues of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars differing in salt tolerance. *Journal of Crop Production and Processing* 7(1): 1-16. (In Farsi).
3. Atlassi Pak, V. 2018. Evaluation of sodium accumulation in leaves of wheat (*Triricum aestivum* L.) cultivars differing in salt tolerance. *Journal of Crop Production* 41: 43-56. (In Farsi).
4. Atlassi Pak, V., O. Bahmani and M. Asadbegi. 2018. Evaluation N^+ concentration and K^+/Na^+ ratio as a criterion for salinity tolerance in wheat and barley. *Journal of Crop Production and Processing* 8(3): 133-143. (In Farsi).
5. Atlassi Pak, V. and O. Bahmani. 2019. Comparisons of chlorophyll content in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars with contrasting of shoot sodium concentration under salinity stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences* 12(2): 579-588.
6. Byrt, C. S., R. Munns, R. A. Burton, M. Gillihamand and S. Wege. 2018. Root cell wall solution for crop plants in

saline soil. *Plant Science* 269: 47-55.
7. Bayoumi, T. Y., S. El-Hendawy, M. S. H. Yousef, M. A. G. Emam and S. A. Okasha. 2014. Application of infrared thermal imagery for monitoring salt tolerant of wheat genotypes. *Journal of American Science* 10: 1-8.
8. Chen, Z., I. Neman, M. Zhou, M. Mendham, G. Zhang and S. Shabala. 2005. Screening plants for salt tolerance by measuring K flux: a case study for barley. *Plant, Cell and Environment* 28: 1230-1246.
9. Chen, Z., M. Zhu, I. Newman, M. Mendham, G. Zhang and S. Shabala. 2007. Potassium and sodium relations in salinised barley tissues as a basis of differential salt tolerance. *Functional Plant Biology* 34: 150-162.
10. Cuin, T. A., Y. Tian, S. Betts, A. R. Chalmandrier and S. Shabala. 2009. Ionic relation and osmotic adjustment in durum and bread wheat under saline conditions. *Functional Plant Biology* 36: 1110-1119.
11. Cuin, T. A., D. Parsons and S. Shabala. 2010. Wheat cultivars can be screened for NaCl salinity tolerance by measuring leaf chlorophyll content and shoot sap potassium. *Functional Plant Biology* 37: 656-664.
12. Deinlein, U., A. Stephan, T. Horie, W. Luo, G. Xu and J. I. Schroeder. 2014. Plant salt tolerance mechanisms. *Trends in Plant Science* 14: 1-9.
13. El-Hendawy, S. E., Y. Hu and U. Schmidhalter. 2005. Growth, ion content, gas exchange, and water relations of wheat genotypes differing in salt tolerances. *Australian Journal of Agricultural Research* 56: 123-134.
14. Esmaeili, A., K. Poustini, H. Ahmadi and A. Abbasi. 2017. Use of IR thermography in screening wheat (*Triticumaestivum* L.) cultivars for salt tolerance. *Archive of Agronomy and Soil Science* 63: 161-170.
15. Genc, Y., G. Mcdonald and M. Tester. 2007. Reassessment of tissue Na^+ concentration as a criterion for salinity tolerance in bread wheat. *Plant, Cell and Environment* 30: 1486-1498.
16. Grewal, H. S. 2010. Water uptake, water use efficiency, plant growth and ionic balance of wheat, barley, canola and chickpea plants on a sodic vertosol with variable subsoil NaCl salinity. *Agricultural Water Management* 97: 148-156.
17. Holden, M. 1976. Chlorophylls. PP. 1-37. *In:* Goodwin T. W., (Eds.), Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments, Academic Press, New York.
18. James, R. A., S. V. Caemmerer, A. G. Condon, A. B. Zwart and R. Munns. 2008. Genetic variation in tolerance to the osmotic stress component of salinity stress in durum wheat. *Functional Plant Biology* 35: 111-123.
19. James, R. A., C. Blake, C. S. Byrtand and R. Munns. 2011. Major genes for Na^+ exclusion, Nax1 and Nax_2 (Wheat HKT1;4 and HKT1;5), decrease sodium accumulation in bread wheat leaves under saline and waterlogged conditions. *Journal of Experimental Botany* 62(8): 2939-2947.
20. James, R. A. and Sirault, X. R. 2012. Infrared thermography in plant phenotyping for salinity tolerance. Plant salt tolerance: Methods and Protocols. *Molecular Biology* 913: 173-189.
21. Jiang, Q., D. Roche, T. A. Monaco and D. Hole. 2006. Stomatal conductance is a key parameter to assess limitations to photosynthesis and growth potential n barley genotypes. *Plant Biology* 8: 515-521.
22. Lemcoff, J. H., F. Ling and P. M. Neumann. 2006. Short episodes of water stress increase barley root resistance to radial shrinkage in a dehydrating environment. *Physiologia Plantarum*127(4): 603-611.
23. Manschadi, A. M., J. Christopher, P. deVoil and G. L. Hammer. 2006. The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Functional Plant Biology* 33: 823-837.
24. Marcinska, I., I. Czyczylo-Mysza, E. Skrzypek, M. Filek, S. Grzesika, M. T. Grzesika, F. Janowika, T. Hura, M. Dziurka, K. Dziurka, A. Nowakowska and S. A. Quarri. 2013. Impact of osmotic stress on physiological and biochemical characteristics in drought susceptible and drought resistant wheat genotypes. *Acta Physiologiae Plantarum* 35: 451-461.
25. Matsuo, N., K. Ozawa and T. Mochizuki. 2009. Genotypic differences in root hydraulic conductance of rice (*Oryza sativa* L.) in response to water regimes. *Plant and Soil* 316: 25-34.
26. Munns, R. 1993. Physiological processes limiting plant growth in saline soil: some dogmas and hypotheses. *Plant, Cell & Environment* 16: 15-24.
27. Munns, R., R. A. James and A. Lauchli. 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany* 57: 1025-1043.
28. Munns, R. and M. Tester. 2008. Mechanism of Salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* 59: 651-681.
29. Munns, R., A. R. Islam, T. D. Colmer and R. James. 2011. *Hordeum marinum* wheat amphiploids maintain higher leaf K^+/ Na^+ and suffer less leaf injury than wheat parents in saline conditions. *Plant Soil* 348: 365-377.
30. Munns, R. and M. Gilliham. 2015. Salinity tolerance of crops-what is the cost? *New Phytologist Journal* 208(3): 668-673.
31. Munns, R., R. James, M. Gilliham, T. J. Flowers and T. D. Colmer. 2016. Tissue tolerance: an essential but elusive trait for salt-tolerant crops. *Functional Plant Biology* 43: 1103-1113.
32. Munoz, N., G. Robert, M. Melchiorre, R. Racca and R. Lascano. 2012. Saline and osmotic stress differentially affects apoplastic and intracellular reactive oxygen species production, curling and death of root hair during *Glycine max* L.–*Bradyrhizobium japonicum* interaction. *Environmental and Experimental Botany* 78: 76-83.
33. Newman, E. I. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *Journal of Applied Ecology* 3(1): 139-145.

34. Palta, J. A., X. Chen, S. P. Milory, J. G. Rebetzke, M. F. Dreccer and M. Watt. 2011. Large root systems: are they useful in adapting wheat to dry environments? *Functional Plant Biology* 38: 347-354.
35. Poustini, K. and A. Siosemardeh. 2004. Ion distribution in wheat cultivars in response to salinity stress. *Field Crops Research* 85: 125-133.
36. Rahnama, A., R. James, K. Poustini and R. Munns. 2010. Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in salin soil. *Functional Plant Biology* 37: 255-263.
37. Rahnama, A., K. Poustini, R. Tavakkol-Afshari and H. Alizadeh. 2011. Growth properties and ion distribution in different tissues of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) differing in salt tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science* 197: 21-30.
38. Rahnama, A., R. Munns, K. Poustini and M. Watt. 2011. A Screening method to identify genetic variation in root growth response to a salinity gradient. *Journal of Experimental Botany* 62: 69-77.
39. Robin, A. H. K., C. Matthew, M. J. Uddin and K. M. Bayazid. 2016. Salinity induced reduction in root surface area and changes in major root and shoot traits at the phytomer level in wheat. *Journa of Experimental Botany* 67(12): 3719-3729.
40. Shabala, S. and T. A. Cuin. 2007. Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiologia Plantarum* 133: 651-669.
41. Shelden, M., U. Roesnner, R. E. Sharp, M. Tester and A. Bacic. 2013. Genetic variation in the root growth response of barley genotypes to salinity stress. *Functional Plant Biology* 40: 516-530.
42. Shelden, M. and U. Roesnner. 2013. Advances in functional genomics for investigating salinity stress tolerance mechanisms in cereals. *Frontiers in Plant Science* 4(123): 1-8.
43. Sirault, X. R., R. A. James and R. T. Furbank. 2009. A new screening method for osmotic component of salinity tolerance in cereals using infrared thermography. *Functional Plant Biology* 36: 970-977.
44. Sun, F. F., W. S. Zhang, H. Z. HU, B. Li, Y. N. Wang, Y. K. Zhao, K. X. Li, M .Y. Liu and X. Li. 2008. Salt modulates gravity signaling pathway to regulate growth direction of primary roots in Arabidopsis. *Plant Physiology* 146: 178-188.
45. Watt, M., L. J. Magee and M. E. Mccully. 2008. Well Publishing LtdTypes, structure and potential for axial water flow in the deepest roots of field-grown cereals. *New Phytologist*, 178: 135-146.
46. Yamaguchi, M. and R. E. Sharp. 2010. Complexity and coordination of root growth at low water potentials: recent advances from transcriptomic and proteomic analyses. *Plant, Cell and Environment* 33(4): 590-603.
47. Zolla. G., Y. M. Heimer and S. Barak. 2010. Mild salinity stimulates a Stressed-induced morphogenic response in Arabidopsis thaliana roots. *Journal of Experimental Botany* 61: 211-224.
48. Zhang, J. L. and H. Shi. 2013. Physiological and molecular mechanism of plant salt tolerance. *Photosynthesis Research* 115: 1-22.

Journal of Crop Production and Processing
Vol. 11, No. 1, Spring 2021, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Assessment of Root Growth and Physiological Responses of Four Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars to Salinity Stress

V. Atlassi Pak[1*] and O. Bahmani[2]

(Received: October 21-2019; Accepted: March 03-2020)

Abstract

Enlarged root systems that extend into the salt affected soil improve water and nutrient capture by plants and can increase plant productivity. In order to examine root system characteristics of four bread wheat cultivars contrasting in salt tolerance (Arg, Ofoq, Tajan and Morvarid) a greenhouse experiment was conducted with applying two salinity levels (0 and 150 mM NaCl) on plants grown in PVC tubes. Salinity led to decreases in total root length, seminal root length, shoot dry weight, root dry weight, shoot K^+ and shoot K^+/Na^+ ratio and increases in shoot Na^+, leaf temperature and chlorophyll content compared to control. Seminal root length was greater in salt tolerant cultivars (Arg and Ofoq) than salt sensitive ones, under saline conditions. Ofoq maintained a greater total root length and Arg indicated a greater reduction (64%) in root length, but total root length was not significantly different among all cultivars under salinity stress. Adverse effects of salinity on shoot dry weight was not notably different in salt tolerant (16%) and salt sensitive (18%) cultivars. There were no significant differences in leaf temperature and chlorophyll content between cultivars. Our results illustrate that initial roots growth reduction is mainly due to the osmotic effects of the salt in roots environment and the extent of salt-induced decreases were similar in salt sensitive and salt tolerant cultivars. Given the effects of salt stress on root system characteristics and root growth response to salinity, it seems that rooting attributes can be used as valuable indices for screening salinity tolerance. The comparison of roots and shoots response to salinity showed that regulation of rooting and nutrient uptake under salt stress conditions is more crucial to salt tolerance than regulation of stomatal conductance.

Keywords: root system, osmotic stress, leaf temperature, salinity tolerance

1. Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: v.atlassi@gmail.com