پاسخ رشد ریشه ذرت (*Zea mays* L.) به شوری و تراکم خاک در شرایط گلخانه‌ای

رضا حسن‌پور[۱*]، محمدرضا نیشابوری[۱] و داود زارع‌حقی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۶/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۶/۲۴)
DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.7.4.41

چکیده

شوری و تراکم خاک از مهم‌ترین محدودیت‌های رشد و تولید گیاهان زراعی به حساب می‌آیند. کنترل این دو پدیده یکی از کلیدهای مدیریت تولید محصول است که پایداری و ثبات تولید و استفاده بهینه از زمین و آب را تضمین می‌کند. تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر توأم شوری و تراکم خاک بر برخی صفات رشدی ریشه ذرت (*Zea mays* L.) انجام پذیرفت. برای این منظور، آزمایشی گلدانی به‌صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. تیمارها شامل سه سطح شوری خاک (هدایت الکتریکی عصاره اشباع ۱/۵، ۲/۵ و ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر) و سه سطح تراکم خاک (جرم مخصوص ظاهری ۱/۳، ۱/۵۵ و ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بودند. برای ایجاد شوری، مقادیر مختلف NaCl در حجم آب مقطر لازم برای رساندن رطوبت جرمی به ۱۶٪ حل و سپس به خاک اضافه گردید. برای ایجاد تراکم خاک، از وزنه ۴/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۴۵ سانتی‌متری بر سطح خاک درون گلدان‌ها رها می‌شد، استفاده گردید. آبیاری گلدان‌ها در طول سه ماه آزمایش از طریق توزین و با آب مقطر انجام گرفت. نتایج نشان داد که اثرهای اصلی شوری و تراکم خاک در سطح احتمال ۱٪ و اثر متقابل آنها در سطح احتمال ۵٪ باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه، حجم ریشه، طول ریشه، میانگین قطر ریشه و نسبت وزن خشک ریشه به وزن خاک گردید. شوری و تراکم به صورت توأم، نسبت به اثر جداگانه آنها، خصوصیات رشدی ریشه ذرت را به‌طور متوسط ۲۰ درصد بیشتر کاهش داد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شوری و تراکم خاک اثر منفی همدیگر را تشدید کرده و منجر به توقف رشد و توسعه ریشه ذرت می‌شوند.

کلمات کلیدی: مدیریت خاک، توسعه ریشه، تنش‌های محیطی، هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری

مقدمه

با توجه به تقاضای فزاینده برای غذا در جهان و رژیم‌های رطوبتی متغیر خاک که وابسته به تغییرات الگوهای آب و هوایی است، فهم فرایندها و عوامل تأثیرگذار بر رشد ریشه بسیار حائز اهمیت است (۱۷). با وجود مطالعات زیاد در این زمینه، هنوز درک اساسی و پایه‌ای مبنی بر اینکه چه فاکتورهایی، برای چه دوره‌ای و تحت کدام شرایط آب و هوایی، رشد ریشه و جذب آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به صورت کافی وجود ندارد. بدون داشتن این اطلاعات، مدیریت خاک به منظور افزایش تولید محصول دشوار است. ریشه، به عنوان یک اندام رویشی مهم، استقرار گیاه در خاک و تأمین آب و مواد معدنی لازم برای رشد و نمو گیاه را بر عهده دارد. جایی که گیاه از نظر تأمین

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: rzh92@yahoo.com

آب و مواد غذایی در وضعیت مطلوبی نباشد سیستم ریشه‌ای گسترده ضروری و حیاتی است. ریشه‌ها قابل رؤیت نبوده و این امر سبب شده است تا با وجود نقش حیاتی آنها، در بسیاری از موارد به حساب نیایند، یا مورد بی‌توجهی قرار گیرند. جذب آب و مواد غذایی و انتقال آنها به اندام‌های هوایی، سنتز تعدادی از هورمون‌های گیاهی مانند جیبرلین و سیتوکنین، ذخیره مواد، به‌خصوص در ریشه‌های مسن‌تر، احیای عناصر معدنی مانند نیتروژن و گوگرد و تکثیر رویشی که ناشی از قابلیت رشد جوانه‌های نابجای روی آنها می‌باشد، از مهم‌ترین وظایف ریشه است (۵).

شوری خاک از مهم‌ترین و متداول‌ترین تنش‌های محیطی در سطح جهان و ایران است. درحدود ۹۵۵ میلیون هکتار از اراضی دنیا متأثر از نمک هستند (۲۵). در ایران، وسعت اراضی شور حدود ۴۴/۵ میلیون هکتار می‌باشد که به درجات مختلف دچار مشکل شوری و قلیائیت هستند (۱۰). آمار دراز مدت حاکی از آن است که سطح زیر کشت سالانه محصولات کشاورزی در کشور از ۱۰ تا ۱۸ میلیون هکتار در نوسان است (۳). در نقشه مطالعات خاک‌شناسی که از سال ۱۳۳۲ تا ۱۳۸۸ انجام شده است، ۶/۸ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی کشور به درجات مختلف مبتلا به شوری تشخیص داده شده‌اند (۹). مقادیر زیاد شوری علاوه بر اینکه بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک تأثیر می‌گذارد، از رشد و نمو گیاهان، به‌ویژه گیاهان حساس به شوری، به‌شدت می‌کاهد و باعث اختلال و توقف رشد و حتی مرگ گیاه می‌شود.

ریشه اولین اندام گیاه است که در معرض شوری خاک قرار می‌گیرد و در بسیاری از موارد نقش مهمی در جلوگیری از انتقال نمک به برگ‌ها دارد. نتایج تحقیق عباسی و همکاران (۶) نشان داد که با اعمال شوری تا سطح ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر کلرید سدیم، تغییر معنی‌داری در طول ریشه گیاه روناس در جعبه‌های پلاستیکی مشاهده نشد، ولی در شوری بیشتر، این ویژگی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، به‌گونه‌ای که طول ریشه از ۲۱/۸۸ سانتی‌متر در شاهد به ۱۴/۳۸ سانتی‌متر در بیشترین سطح شوری (۲۰ دسی‌زیمنس بر متر) تغییر کرد. حبیب‌اللهی و همکاران (۴) گزارش کردند که تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار در طول ریشه در هر دو رقم برنج (رقم متحمل زاینده رود و رقم حساس خزر) گردید. بیشترین طول ریشه (۹/۴۶ سانتی‌متر در رقم متحمل و ۶/۹۶ سانتی‌متر در رقم حساس) در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار NaCl و کمترین آن (۴/۵ سانتی‌متر در رقم متحمل و ۲ سانتی‌متر در رقم حساس) در تیمار ۲۰۰ میلی‌مولار به‌دست آمد.

علاوه بر شوری، عوامل زیادی در رشد طولی و گسترش ریشه ممکن است دخالت داشته باشند که مهم‌ترین آنها مقاومت مکانیکی و تراکم خاک است. تراکم خاک یکی از شکل‌های فیزیکی تخریب خاک است که ساختمان خاک را تغییر می‌دهد و بر باروری خاک تأثیر می‌گذارد. تخمین زده شده که تخریب خاک ناشی از تراکم در حدود ۶۸ میلیون هکتار از زمین‌های جهان را تحت تأثیر قرار داده است (۲۴). افزایش مقاومت مکانیکی باعث کاهش رشد و اندازه ریشه در اکثر گیاهان زراعی می‌شود. رقوان و همکاران (۲۶) در آزمایشی، ذرت علوفه‌ای را در تراکم‌های مختلف خاک کاشته و نشان دادند که هرچه تعداد تردد تراکتور بیشتر شود نفوذ ریشه کاهش می‌یابد. هنگامی که خاک با ۱۵ بار تردد تراکتور متراکم شد، عمق نفوذ ریشه به یک سوم خاک غیر متراکم کاهش یافت. گرزسیاک (۱۸) تأثیر تراکم خاک را بر مؤلفه‌های رشد ذرت (رقم سینگل کراس، نووا) و تریتیکاله (رقم سی اچ دی-۱۴۷) مطالعه کرد. وی هر دو گیاه را در شرایط کنترل شده در خاک با تراکم‌های ۱/۳، ۱/۴۷ و ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب کشت نمود. در تیمارهای CS2 (جرم مخصوص ظاهری ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و CS3 (جرم مخصوص ظاهری ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در مقایسه با تیمار CS1 (جرم مخصوص ظاهری ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) طول ریشه‌های اصلی به ترتیب تا ۲۵ و ۳۵ درصد در تریتیکاله و ۴۰ و ۵۰ درصد در ذرت کاهش یافت. کاهش طول کل ریشه‌های فرعی به ترتیب ۴۰ و ۵۰ درصد در تریتیکاله و ۵۰ و ۵۵ درصد در ذرت بود. محدودیت

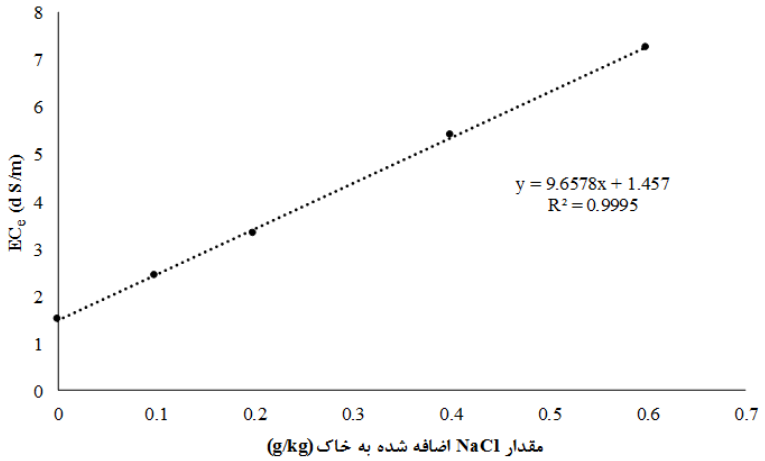
در رشد ریشه به‌وسیله تراکم در ذرت نسبت به تریتیکاله شدیدتر بود. برای هر دو گیاه، عامل اصلی در کاهش طول ریشه، افت شدید تعداد ریشه‌های فرعی تشخیص داده شد. قاسمی و همکاران (۸) گزارش کردند که با افزایش تراکم خاک، حجم ریشه ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) از ۱۰۷ سانتی‌متر مکعب در جرم مخصوص ظاهری ۱/۵۲ با ۴۹ درصد کاهش به ۵۴/۵ سانتی‌متر مکعب در جرم مخصوص ظاهری ۱/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسید. رمضان و همکاران (۲۷) کاهش معنی‌دار طول ریشه ذرت (رقم جلال) را در تیمارهای تحت تأثیر تراکم خاک بررسی کردند. مشاهده گردید که عبور چهار بار تراکتور در مزرعه، طول ریشه ذرت را نسبت به بدون عبور (شاهد) حدود ۲۱٪ کاهش داد. اخوان و همکاران (۱) گزارش کردند که با افزایش درجه تراکم خاک از صفر به ۲۰٪، چگالی طول ریشه گندم (رقم شهریار) از ۶۶۳۳ به ۲۷۰۲ کیلومتر بر متر مکعب کاهش یافت. گرزسیاک و همکاران (۱۹) مشاهده کردند که در خاک متراکم، جرم خشک ریشه در لایه عمیق‌تر خاک برای ذرت (رقم سنگل کراس، نووا) و تریتیکاله (رقم سی اچ دی-۱۴۷) کاهش می‌یابد. آنان سه سطح تراکم کم (۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، متوسط (۱/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و شدید (۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) را در خاک ایجاد کرده و ذرت و تریتیکاله را کاشتند. اختلافات بارز در توزیع ریشه‌ها در پروفیل خاک (۴۰-۰ سانتی‌متری) مشاهده شد. در تیمارهای تراکم متوسط و شدید، در مقایسه با تیمار بدون تراکم، جرم خشک ریشه حدود ۴۱٪ کاهش یافت. همچنین، کاهش شدیدی در بیوماس ریشه در تیمارهای تراکم متوسط و شدید در پروفیل خاک در عمق ۴۰-۱۵ سانتی‌متری مشاهده شد.

ذرت در بین غلات و بعد از گندم و برنج مهم‌ترین ماده غذایی دنیا را تشکیل می‌دهد. پتانسیل عملکرد ذرت در واحد سطح به گونه‌ای است که برداشت ۱۵ تا ۲۰ تن دانه در هکتار در سطح تجاری رایج می‌باشد و به‌دلیل استعداد زیاد در تولید دانه، ذرت را پادشاه غلات نامیده‌اند (۲). در بین غلات، ذرت بیشترین تنوع مصرف کننده را داراست، زیرا افزون بر مصرف به عنوان غذای انسان و دام، در صنایع تخمیر و تهیه فرآورده‌های متنوع صنعتی، از جمله اتانول، نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲). ذرت در تحقیقات گیاهی نقشی اساسی دارد. گیاهی که از یک طرف نسبتاً حساس به شوری بوده و از طرف دیگر از سرعت رشد زیادی برخوردار است، خصوصیات رشدی آن را می‌توان دقیق‌تر و راحت‌تر اندازه‌گیری کرد و اثر شوری و تراکم را با وضوح در آن دید و ارزیابی نمود.

مطالعات محدودی در ارتباط با تأثیر توأم شوری و تراکم خاک وجود دارد و به خصوص در ایران عملاً اطلاعاتی در این موضوع وجود ندارد. ولی هر دو به‌تنهایی به عنوان مشکل و محدودیت عمده در تولیدات کشاورزی در منابع گزارش شده‌اند (۱۱، ۱۴، ۲۰، ۲۲ و ۲۸). لذا، تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر توأم شوری و تراکم خاک روی صفات رشدی ریشه ذرت انجام شد.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر، در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، با میانگین دمای ۲۵ تا ۳۵ درجه سلسیوس در روز و ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس در شب و رطوبت نسبی ۴۰ تا ۵۰ درصد، به صورت گلدانی انجام شد. برای این منظور، از قسمت سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر) خاک مزرعه در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، با بافت لوم شنی، نمونه مرکب تهیه شد و پس از هواخشک کردن، از الک ۴/۷۶ میلی‌متری گذرانده شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک توسط روش‌های متداول اندازه‌گیری گردید. از لوله‌های پی‌وی‌سی به قطر ۱۵ و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر به عنوان گلدان استفاده شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور هر کدام در سه سطح و با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول شوری خاک بود که در سه سطح (۱/۵، ۲/۵ و ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر) اعمال گردید. این سطوح شوری براساس معادله ماس و هافمن (۲۳) و با توجه به آستانه تحمل ذرت به



شکل ۱. تغییرات EC عصاره گل اشباع با NaCl اضافه شده به خاک (با EC_e اولیه ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر)

شوری خاک در نظر گرفته شد. برای تهیه خاک‌هایی با EC ذکر شده، مقادیر مختلف NaCl در حجم آب از پیش تعیین شده (که لازم بود رطوبت خاک را به ۱۶٪ جرمی برساند) به صورت یکنواخت به یک کیلوگرم خاک اضافه شد و پس از گذشت یک روز، EC_e خاک اندازه‌گیری و شکل ۱ رسم گردید. مقادیر مورد نیاز NaCl به صورت محلول در آب برای رسیدن به شوری‌های مورد نظر از روی رابطه به‌دست آمده در شکل ۱ محاسبه و به خاک با وزن معین اضافه گردید.

فاکتور دوم، تراکم خاک بود که در سه سطح جرم مخصوص ظاهری (۱/۳، ۱/۵۵ و ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) اعمال گردید. این سطوح تراکم براساس آزمایش‌های مقدماتی و با توجه به مقاومت مکانیکی ایجاد شده در رطوبت ۱۶٪ وزنی (رطوبت بهینه برای ایجاد تراکم در خاک مورد آزمایش) انتخاب شد. در کمتر از درصد رطوبت وزنی مذکور، جرم مخصوص ظاهری بیشتر از ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب ایجاد نشد و در بیشتر از آن، مقاومت مکانیکی‌های ایجاد شده در سه سطح تراکم اختلاف کمی نشان دادند. مقدار خاک مورد نیاز در هر سطح تراکم (جرم مخصوص ظاهری) برای هر گلدان از روابط زیر محاسبه شد:

$$m_w = Db_w \times V_t \quad [۱]$$

$$Db_w = Db_d(1+\theta m) \quad [۲]$$

$$V_t = \pi r^2 h \quad [۳]$$

در روابط بالا، m_w وزن خاک مرطوب (g)، Db_d و Db_w به ترتیب جرم مخصوص ظاهری خشک و مرطوب (g/cm^3)، V_t حجم گلدان (cm^3)، θ_m رطوبت جرمی خاک (g/g)، r شعاع گلدان (cm) و h ارتفاع گلدان می‌باشد. خاک مورد نیاز برای هر گلدان به پنج قسمت مساوی تقسیم شد تا تراکم خاک در پنج مرحله صورت پذیرد تا حتی‌الامکان تراکم نسبتاً یکنواختی در خاک گلدان‌ها ایجاد شود. تراکم خاک با استفاده از وزنه ۴/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۴۵ سانتی‌متری به صورت سقوط آزاد بر سطح خاک گلدان‌ها رها می‌شد، ایجاد گردید.

بعد از ایجاد سطوح شوری و تراکم، در هر گلدان ۶ بذر ذرت (*Zea mays* L.) رقم سینگل کراس ۷۰۴ قرار داده شد و آزمایش شروع شد. برای اینکه گیاهان بتوانند به‌راحتی جوانه زده و با تنش شوری و محدودیت جرم مخصوص ظاهری مواجه نشوند، روی بذرهای موجود در داخل هر گلدان، ۵ سانتی‌متر خاک معمولی (خاکی که نه با تنش شوری مواجه بود و نه با محدودیت جرم مخصوص ظاهری) ریخته شد. بعد از سبز شدن، چهار عدد از بوته‌ها حذف شده و دو بوته سالم و شاداب‌تر حفظ شد. این آزمایش تا پایان مرحله رشد رویشی (ابتدای مرحله رشد زایشی) که حدود سه ماه طول کشید، ادامه یافت. در پایان آزمایش، گلدان‌هایی که در آنها جرم مخصوص ظاهری ۱/۳ و ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب ایجاد شده بود، به‌صورت عمودی به کف زمین کوبیده شدند و ستون‌های خاک

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	کلاس بافتی (USDA)	OC(٪)	CEC ($cmol_c/kg$)	pH_e	CCE(٪)	EC_e (dS/m)
٦٢/٨	٢٢/٥	١۴/٧	لوم شنی	٢/١	٧٥/٥	٨/٧	٢٠/٥	١/٥

جدول ۲. خلاصه نتایج تجزیه واریانس اثر شوری و تراکم خاک بر صفات رشدی ریشه ذرت

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		RDW	RV	RL	RMD	RW/SW
تکرار	٢	٠/۴۴^{ns}	٨/٨٢^{ns}	٣۴٧٢٥٣^{ns}	٠/٠٩^{ns}	٠/٠٠۶^{ns}
شوری خاک	٢	۴/٧٠**	١١٩/٠١**	٣٧٢۶٠٧١**	٠/٩١**	٠/٠۶**
تراکم خاک	٢	٧/٢٧**	١٩٠/١۶**	٥٧٥٩٩٥٥**	٧/۴٠**	٠/٢۶**
شوری × تراکم	۴	١/٩٣*	٥٠/٢١*	١٥٢۶٥٨۴*	٠/٥۴*	٠/٠٢*
خطای آزمایشی	١۶	٠/۴٩	١٣/٣١	٣٩٣٥٧۴	٠/١٧	٠/٠٠۶
ضریب تغییرات (٪)	–	١٢/٨٢	١٢/٥١	١٢/٨٢	٨١/١٩	١٢/٩٥

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ١٪ و ٥٪ و بدون اختلاف معنی‌دار. RDW: وزن خشک ریشه، RV: حجم ریشه، RL: طول ریشه، RMD: میانگین قطر ریشه و RW/SW: نسبت وزن ریشه به وزن خاک است.

به صورت کامل از داخل گلدان‌ها خارج شدند. گلدان‌هایی که در آنها جرم مخصوص ظاهری ١/٧٥ گرم بر سانتی‌متر مکعب ایجاد شده بود به‌وسیله اره تیز به‌صورت طولی برش داده شدند، به‌گونه‌ای که آسیبی به ریشه‌ها وارد نشد. ستون‌های خاک خارج شده در طول به سه قسمت (مساوی هر کدام ١٠ سانتی‌متر) تقسیم و ریشه‌های هر قسمت تا جایی که امکان داشت به‌صورت دستی از خاک جدا گردید. برای جدا کردن ریشه‌های باقی مانده در خاک از الک استفاده شد. در داخل الک، خاک اطراف ریشه‌ها به‌صورت کامل شستشو داده شد. بعد از آن، بلافاصله تمام ریشه‌های جدا شده از هر ستون خاک یا گلدان در درون یک استوانه ١٠٠ میلی‌لیتری که دارای حجم مشخصی از آب بود غوطه‌ور گردید و از افزایش حجم آب استوانه، حجم کل سیستم ریشه (Root volume, RV) تعیین شد. میانگین قطر ریشه‌ها (Root mean diameter, RMD) توسط ریزسنج (Micrometer) در پنج تا نخ ریشه جدا شده در هر گلدان اندازه‌گیری گردید. مجموعه ریشه‌های جدا شده از هر گلدان به پاکت‌های کاغذی منتقل و به مدت ۴٨ ساعت در آون با دمای ٧٠ درجه سلسیوس خشک شدند. وزن خشک ریشه‌ها (Root dry weight, RDW) با ترازوی حساس (دقت ٠/٠٠١±گرم) تعیین شد. طول ریشه‌ها (Root length, RL) با استفاده از رابطه ۴ تعیین شد (٧):

$$RL(cm) = RDW(mg) \times 0.89 \qquad [۴]$$

با توجه به اینکه وزن خاک گلدان‌ها در سه سطح جرم مخصوص ظاهری متفاوت بود، لذا برای تعیین مقدار ریشه در واحد وزن خاک، وزن ریشه‌های هر گلدان بر حسب گرم بر وزن خاک بر حسب کیلوگرم تقسیم و با عنوان نسبت وزن خشک ریشه به وزن خشک خاک (RW/SW) برحسب گرم بر کیلوگرم محاسبه شد. تجزیه واریانس داده‌ها با نرم‌افزارهای SPSS و MSTATC انجام شد و نمودارها با نرم‌افزار EXCEL ترسیم گردید. برای مقایسه میانگین‌های شاخص‌های مورد اندازه‌گیری از آزمون LSD در سطح احتمال ٥٪ استفاده شد.

نتایج و بحث

برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ١ آورده شده است. اثرهای اصلی شوری و تراکم خاک بر RDW، RV، RL، RMD و RW/SW در سطح احتمال ١٪ و اثر متقابل شوری و تراکم خاک بر صفات مذکور در سطح احتمال ٥٪ معنی‌دار شدند (جدول ٢).

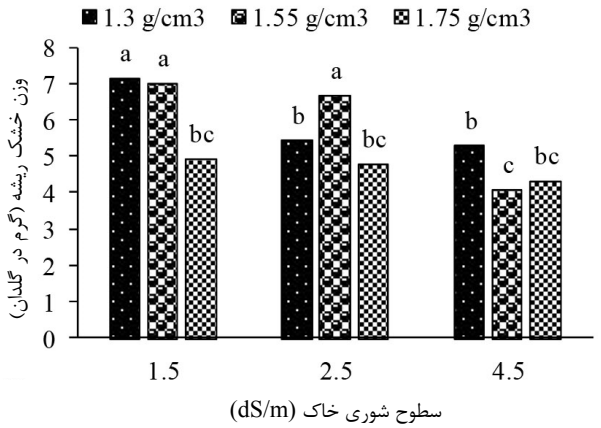
جدول ۳. درصد کاهش مقادیر صفات رشدی ریشه ذرت با افزایش شوری و تراکم خاک

مقدار افزایش	RDW	RV	RL	RMD	RW/SW
از ۱/۵ به ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر	۰/۷	۱/۵	۰/۷	۷/۲	۰/۲
از ۲/۵ به ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر	۲۰/۹	۱۹/۵	۲۰/۸	۲۹/۹	۲۲/۰
از ۱/۳ به ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب	۱۱/۵	۱۰/٦	۱۱/۵	۴۲/۳	۲۴/۱
از ۱/۵۵ به ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب	۱۸/۹	۱۸/۷	۱۸/۹	۳۵/۷	۲۷/۱
شوری از ۱/۵ به ۲/۵ و تراکم از ۱/۳ به ۱/۵۵	٦/۸	٦/۱	٦/۷	۴۱/۵	۲۸/۰۹
شوری از ۲/۵ به ۴/۵ و تراکم از ۱/۵۵ به ۱/۷۵	۳۵/۰	۳۴/۱	۳۵/۱	۴٦/۷	۳۰/۱٦

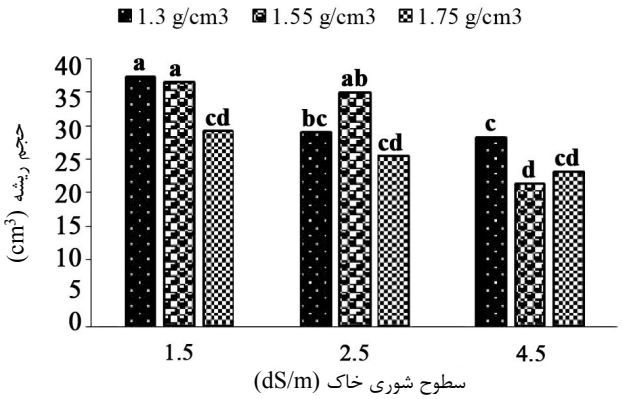
اعمال تیمار شوری خاک به تنهایی باعث کاهش کلیه صفات ریشه ذرت شد، به‌طوری که بیشترین مقدار RDW، RV، RMD، RL و RW/SW در شوری ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر و کمترین مقدار آنها در شوری ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده گردید. به‌دنبال افزایش شوری از ۱/۵ به ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر، مقادیر صفات رشدی ریشه ذرت به‌طور متوسط حدود ۲۴٪ کاهش یافت. نتیجه به دست آمده با نتایج حبیب‌اللهی و همکاران (۴) مبنی بر کاهش رشد ریشه برنج در اثر تنش شوری مطابقت دارد. همانند شوری خاک، تراکم خاک نیز موجب کاهش صفات رشد ریشه ذرت شد. بیشترین مقادیر صفات ریشه‌ای مذکور در جرم مخصوص ظاهری ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و کمترین مقادیر آنها در جرم مخصوص ظاهری ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب حاصل شد. به‌دنبال افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک از ۱/۳ به ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مقادیر صفات رشدی ریشه ذرت به‌طور متوسط حدود ۳۸ درصد کاهش یافت. در مطالعه توبیله و همکاران (۲۹) نیز افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک از ۱/۳ به ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باعث کاهش حدود ۲۷ و ۱۰ درصدی به‌ترتیب در وزن خشک و طول ریشه ذرت شد. در جدول ۳ درصد کاهش مقادیر صفات ریشه‌ای اندازه‌گیری شده در اثر افزایش شوری و تراکم خاک آورده شده است. در اثر افزایش شوری از ۱/۵ به ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر، مقادیر مربوط به صفات ریشه‌ای کاهش معنی‌داری نشان ندادند. ولی به‌دنبال افزایش شوری از ۲/۵ به ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر، رشد و توسعه ریشه به‌صورت معنی‌دار کاهش یافت. در مورد تراکم خاک، هم افزایش جرم مخصوص ظاهری از ۱/۳ به ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و هم افزایش از ۱/۵۵ به ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باعث کاهش معنی‌دار رشد و توسعه ریشه گردید. در ارتباط با اثر متقابل شوری و تراکم خاک، افزایش توأم شوری از ۱/۵ به ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر و جرم مخصوص ظاهری از ۱/۳ به ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، موجب کاهش معنی‌دار RDW، RV و RL نشد، ولی کاهش RMD و RW/RS ناشی از آنها معنی‌دار بود. افزایش توأم شوری از ۲/۵ به ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر و جرم مخصوص ظاهری از ۱/۵۵ به ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باعث کاهش معنی‌دار و قابل توجه همه صفات اندازه‌گیری شد (جدول ۳). به‌طور کلی، در مطالعه حاضر، در سطوح شوری و تراکم به‌کار رفته، به‌طور متوسط تراکم خاک بیش از شوری خاک باعث کاهش صفات ریشه‌ای ذرت گردید.

اثر متقابل شوری و تراکم خاک از نظر کاهش، بیشتر از اثرهای اصلی آنها بر رشد ریشه تأثیر گذاشت، به گونه‌ای که افزایش توأم شوری از ۱/۵ به ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر و جرم مخصوص ظاهری از ۱/۳ به ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باعث کاهش ۳۹، ۳۸، ۳۹، ۶۹ و ۵۳ درصدی در RDW، RV، RL، RMD و RW/SW گردید (شکل‌های ۲ تا ۶).

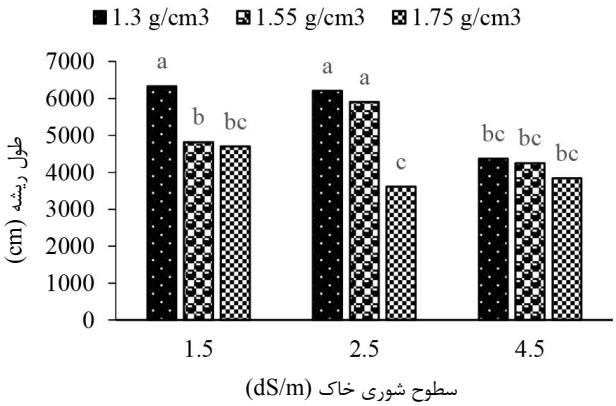
همانطور که در شکل‌های ۲ تا ۶ مشاهده می‌شود، در مورد RDW و RV روند اثر متقابل یکسان بوده و در مورد سه پارامتر دیگر یعنی RL، RMD و RW/SW این روند شبیه هم بود. در



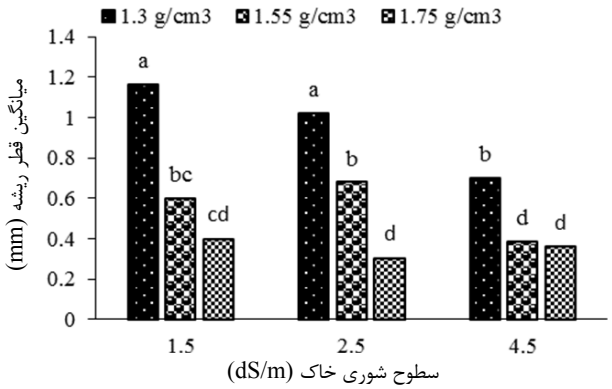
شکل ۲. مقایسه میانگین‌های وزن خشک ریشه در سطوح مختلف شوری و تراکم خاک



شکل ۳. مقایسه میانگین‌های حجم ریشه ذرت در سطوح مختلف شوری و تراکم خاک



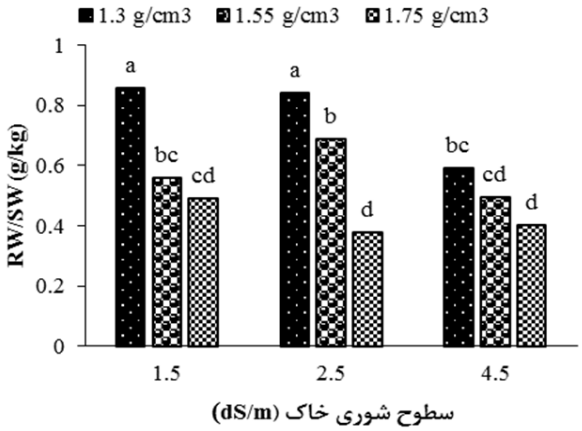
شکل ۴. مقایسه میانگین‌های طول ریشه ذرت درسطوح مختلف شوری و تراکم خاک



شکل ۵. مقایسه میانگین‌های قطر ریشه ذرت در سطوح مختلف شوری و تراکم خاک

تنش آب (در اثر افزایش فشار اسمزی)، سمیت یونی و اختلالات تغذیه‌ای می‌تواند رشد ریشه را با محدودیت مواجه کند (۲۱).

تراکم خاک به‌دلیل افزایش مقاومت مکانیکی (۱۲) و کاهش تهویه (۲۰)، از ریشه‌دوانی و رشد و توسعه ریشه گیاه در خاک جلوگیری می‌کند. به دنبال آن، حجم خاک قابل دسترس ریشه کاهش می‌یابد و ریشه از جذب آب و مواد غذایی کافی محروم می‌ماند. دلیل دیگر کند شدن یا کاهش رشد ریشه در خاک‌های متراکم این است که ریشه‌ها توان ایجاد فشار تورمی جهت کنار زدن خاک و نفوذ به خاک را ندارند (۱۳). پاسخ‌های معمول و عادی ساختمان سیستم ریشه گیاه به تراکم خاک شامل کاهش



شکل ۶. مقایسه میانگین‌های نسبت وزن خشک ریشه به وزن خشک خاک در سطوح مختلف شوری و تراکم خاک

خاک‌های شور، تجمع املاح در اطراف ریشه عموماً با ایجاد

در تعداد و طول ریشه‌ها (۱۸)، محدودیت در نفوذ ریشه‌های اصلی به لایه‌های پایین (۱۹)، افزایش نسبت جرم خشک بخش هوایی به ریشه (۱۹) و کاهش در عملکرد محصول دانه می‌باشد (۱۵). در شرایطی که هر دو تنش ذکر شده (شوری و تراکم) در خاک ایجاد شود، ریشه هم از تنش شوری رنج می‌برد و هم با محدودیت تراکم خاک مواجه می‌شود و به دنبال آن رشد و عملکرد گیاه به شدت کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

اثرهای اصلی شوری و تراکم خاک باعث کاهش معنی‌دار ($P\leq$ ۰/۰۱) صفات رشدی ریشه ذرت شد. در سطوح شوری و تراکم به‌کار رفته، به‌طور متوسط، تراکم بیش از شوری خاک بر صفات رشدی ریشه ذرت تأثیر گذاشت و منجر به کاهش آنها گردید. اثر متقابل شوری و تراکم خاک در سطح احتمال ۵٪ موجب کاهش معنی‌دار صفات اندازه‌گیری شده شد. افزایش توأم شوری از ۱/۵ به ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر و جرم مخصوص ظاهری از ۱/۳ به ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باعث کاهش ۳۹، ۳۸، ۳۹، ۶۹ و ۵۳ درصدی در وزن خشک، حجم، طول، میانگین قطر و نسبت وزن خشک ریشه به خاک گردید. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که شوری و تراکم به صورت توأم، نسبت به اثرهای جداگانه آنها، خصوصیات رشدی ریشه ذرت را به‌طور متوسط ۲۰٪ بیشتر کاهش داد. پس می‌توان نتیجه گرفت که شوری و تراکم خاک اثر منفی همدیگر را تشدید کرده و منجر به توقف رشد و توسعه ریشه ذرت می‌شوند. بنابراین، یکی از راه‌های غیرمستقیم کاهش اثرهای نامطلوب شوری بر رشد و عملکرد محصول، می‌تواند اعمال مدیریت‌های مختلف برای جلوگیری از متراکم شدن خاک‌ها باشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مدیریت محترم گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه تبریز که همکاری صمیمانه‌ای برای انجام این تحقیق در گلخانه این گروه داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. اخوان، س.، م. شعبانپور و م. اصفهانی. ۱۳۹۱. اثر تراکم و بافت خاک بر رشد ریشه و اندام هوایی گندم. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۶(۳): ۷۲۷- ۷۳۵.

۲. امام، ی. ۱۳۸۶. زراعت غلات. انتشارات دانشگاه شیراز.

۳. بی‌نام، ۱۳۹۰. آمارنامه‌های کشاورزی. دفتر آمار و فناوری اطلاعات، تهران.

۴. حبیب‌اللهی، ن.، م. مهدیه و م. ر. امیرجانی. ۱۳۹۱. اثر تنش شوری بر رشد، پرولین، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کارایی فتوسیستم II در ارقام حساس و مقاوم برنج. مجله زیست‌شناسی گیاهی ۴(۱۳): ۸۵-۹۶.

۵. سلطانی، ا. ۱۳۸۶. رابطه آب خاک و گیاه. انتشارات جهاد دانشگاهی، مشهد.

۶. عباسی، ف.، ع. کوچکی و آ. جعفری. ۱۳۸۸. ارزیابی جوانه‌زنی و رشد رویشی گیاه روناس (*Rubia tinctorum* L.) در غلظت‌های مختلف NaCl. پژوهش‌های زراعی ایران ۷(۲): ۵۱۵-۵۲۵.

۷. علیزاده، ا. ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. نتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد.

۸. قاسمی، ع.، م. شرفا و غ. ثوابقی فیروزآبادی. ۱۳۹۱. اثر تراکم بر توزیع اندازهٔ منافذ خاک و رشد سیستم ریشه‌ای گیاه ذرت. مجموعه مقالات دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران، ۱۲-۱۴ شهریور ماه، دانشگاه تبریز.

۹. مؤمنی، ع. ۱۳۸۹. پراکنش جغرافیایی و سطوح شوری منابع خاک ایران. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) ۲۴(۳): ۲۰۳-۲۱۵.

10. Banaei, M.H., M. Bybordi, A. Momeni and M.J. Malakooti. 2005. The Soils of Iran, New Achievements in Perception, Management and Use. Soil and Water Research Institute, Sana Press, Tehran.
11. Bayhan, Y., B. Kayisoglu and E. Gonulol. 2002. Effect of soil compaction on sunflower growth. Soil Till. Res. 68: 31-38.
12. Bouwman, L. and W. Arts. 2000. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. Appl. Soil Ecol. 14: 213-222.
13. Chan, G. and R.R. Weil. 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soil. Plant Soil 331: 31-43.
14. Chen, G. and R.R. Weil. 2011. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. Soil Till. Res. 117: 17-27.
15. Fageria, N.K., V.C. Balingar and R.B. Clark. 2006. Physiology of Crop Production. The Haworth Press, Inc., New York, pp. 23-60.
16. Flowers, M.D. and R. Lal. 1998. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollicochraqualf in northwest Ohio. Soil Till. Res. 48: 21-35.
17. Glyn Bengough, A., B.M. McKenzie, P.D. Hallett and T.A. Valentine. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. J. Exp. Bot. 62(1): 59-68.
18. Grzesiak, M.T. 2009. Impact of soil compaction on root architecture, leaf water status, gas exchange and growth of maize and triticale seedlings. Plant Root 3: 10-16.
19. Grzesiak, S., M.T. Grzesiak, T. Hura, I. Marcinska and A. Rzepka. 2013. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedling affected by soil compaction. Environ. Exp. Bot. 88: 2-10.
20. Ishaq, M., A. Hassan, M. Saeed, M. Ibrahim, and R. Lal. 2001. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan. I. Soil physical properties and crop yield. Soil Till. Res. 59: 57-65.
21. Khan, M.A., S.V. Witzke-Ehbrecht, B.L. Maass and H.C. Becker. 2009. Relationships among different geographical groups, agromorphology, fatty acid composition and RAPD marker diversity in safflower (*Carthamus tinctorius*). Genet. Resour. Crop Ev. 56: 19-30.
22. Koyro, H.W. 2006. Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). Environ. Exp. Bot. 56: 136-146.
23. Mass, E.V. and G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. ASCE, J. Irrig. Drain. Div. 103: 115-134.
24. Oldeman, L.R., R.T.A. Hakkeling and W.G. Sombroek. 1991. World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation, An Explanatory Note. ISIRC, Wageningen, Netherlands/UNEP, Nairobi, Kenya, 34 p.
25. Pessarakli, M. and I. Szabolcs. 2011. Soil salinity and sodicity as particular plant/crop stress factors. PP. 3-21. *In:* Pessarakli, M. (Ed.), Handbook of Plant and Crop Stress, 3rd Ed., CRC Press, Boca Raton, FL.
26. Raghavan, G.S.V., E. McKyes and M. Ghasse. 1976. Soil compaction patterns caused by off-road vehicles in Eastern Canadian agricultural soils. J. Terramechanics 13: 107-115.
27. Ramazan, M., G. Daraz Khan, M. Hanif and S. Ali. 2012. Impact of soil compaction on root length and yield of corn (*Zea mays*) under irrigated condition. Middle-East J. Sci. Res. 11(3): 382-385.
28. Sultana, N., T. Ilkeda and R. Itoh. 1999. Effect of NaCl salinity on photosynthesis and dry matter accumulation in developing rice grains. Environ. Exp. Bot. 42: 211-220.
29. Tubeileh, A., V. Groleau-Renaud, S. Plantureux and A. Guckert. 2003. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system. Soil Till. Res. 71: 151-161.