

مقاله علمی-پژوهشی

اثر آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در شرایط حضور سطح ایستابی شور و کم‌عمق بر توزیع دوبعدی رطوبت و شوری خاک، ویژگی‌های مورفولوژیکی و عملکرد ذرت

سیما عبدلی^۱، احمد فرخیان فیروزی^{۲*}، فریبرز عباسی^۳ و عبدعلی ناصری^۴

چکیده

بخش کشاورزی در جنوب ایران به خاطر قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه‌خشک با شوری خاک ناشی از حرکت کاپیلاری نمک از سطح ایستابی شور کم‌عمق به سطح خاک و کاهش عملکرد محصول مواجه است. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و زیرسطحی (SDI) و حضور سطح ایستابی شور (۱۰ دسی زیمنس بر متر) کم‌عمق ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر بر عملکرد گیاه ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۳ (SC 703))، بهره‌وری مصرف آب آبیاری و همچنین توزیع رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک در بهار و تابستان سال ۱۳۹۹ بوده است. آزمایش مزرعه‌ای به صورت فاکتوریل طرح پایه بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در لایسیمترهای زهکش دار پر شده با خاک لومی (جرم مخصوص ظاهری ۱/۴۵ گرم بر سانتی مترمکعب) انجام شد. نتایج نشان داد که در آبیاری زیرسطحی در هر دو تیمار SDI100 و SDI60 تجمع نمک در بالای قطره‌چکان، به طور معناداری (در سطح یک درصد) بیشتر از سیستم آبیاری سطحی بوده است. عملکرد ذرت تابستانه بیش از بهاره بود. همچنین در فصل تابستان، آبشویی در منطقه توسعه ریشه در تیمارهای SDI100 و SDI60 سبب افزایش عملکرد گیاه ذرت به ترتیب ۲۵ و ۶۱ درصد و بهره‌وری مصرف آب آبیاری به ترتیب ۲۵ و ۵۸ درصد نسبت به تیمارهای DI100 و DI60 شد. تبخیر در SDI با سطح ایستابی ۶۰ سانتی‌متر، ۲۶ تا ۳۰ درصد و برای سطح ایستابی ۱۰۰ سانتی‌متر، به مقدار ۴۳ تا ۵۱ درصد کمتر از DI بود. نتایج این تحقیق نشان داد که SDI بیش از DI در کنترل شوری پروفیل خاک و عملکرد گیاه مؤثر هست.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، تنش شوری، گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۳، مناطق خشک و

نیمه‌خشک

تنش غیر زیستی وارده بر گیاهان هستند که سبب کاهش محصولات کشاورزی به صورت گسترده می‌شود (Minhas et al., 2020). تقریباً $4/5 \times 10^7$ هکتار از زمین‌های تحت آبیاری (۱۹/۵ درصد از کل $2/3 \times 10^8$ هکتار در سطح جهان) متأثر از خاک شور هستند (FAO, 2020). این امر فشار زیادی بر تولیدات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک وارد کرده و سبب افزایش استفاده از روش‌های مختلف آبیاری برای مقابله با تنش آبی و شوری بالقوه شده است (Monaghan et al., 2013). در بخش کشاورزی، این امر نیازمند بهبود روش آبیاری و برنامه‌ریزی مناسب آبیاری است (Ibrahim et al., 2016). به‌ویژه در مواقعی که کشاورزان با آبیاری بیش‌ازحد سبب هدر رفت و کاهش راندمان مصرف آب و در نتیجه بالا آمدن سطح

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب و شوری خاک دو

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران (*نویسنده مسئول): E-mail: (a.farrokhian@scu.ac.ir)

^۳ استاد موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

^۴ استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰

نظر گرفتن عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب، برای گیاه ذرت حد آستانه تنش پتانسیل ماتریک در آبیاری قطره‌ای و در خاک شور ۳۰- کیلو پاسکال پیشنهاد شد (Zhang et al., 2021).

گیاهان با توسعه ریشه و افزایش جذب آب از مناطقی از خاک که رطوبت بیشتر (مکش کمتر) دارد، نه تنها با شرایط خشکی سازگار می‌شوند، بلکه کاهش جذب از مناطق با تنش رطوبتی بیشتر را جبران می‌کنند. این جبران آب مکانیسمی است که به وسیله آن پوشش گیاهی به تنش در مقیاس‌های زمانی بسیار کوتاه‌تر پاسخ می‌دهد تا با کمبود آب مقابله کند (Teuling et al., 2006). به عنوان مثال، زمانی که مقدار رطوبت در نزدیکی سطح خاک کاهش می‌یابد، ریشه‌های عمیق‌تر گیاه با جذب آب با نرخ جذب بالاتر در محلی که آب به راحتی در دسترس است، کمبود آب لایه‌های سطحی را جبران می‌کنند. این رفتار جبرانی به گیاهان اجازه می‌دهد تا با سرعت بالقوه یا نزدیک به آن، حتی در شرایطی که بخشی از سیستم ریشه دسترسی محدودی به آب دارد، به تعرق ادامه دهد (Braud et al., 2005; El Maayar et al., 2009; Yadav et al., 2009). تراکم طول ریشه گیاه (RLD) و توانایی آن در جذب آب می‌تواند در برآوردن نیازهای تعرق در زمانی که تغییرات زیادی در رطوبت خاک در سطوح ناحیه فعال ریشه وجود دارد، مانند شرایط سطح ایستابی کم عمق، اهمیت فراوانی دارد. سویلو و همکاران تأثیر سطح ایستابی کم عمق را بر توسعه ریشه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که گیاه ذرت ریشه‌زایی را در مناطق با رطوبت کمتر توسعه می‌دهد و این امر تنها به دلیل وجود سطح ایستابی کم عمق بوده که منطقه اشباعی را ایجاد کرده و محدودیت‌هایی در برابر رشد ریشه ایجاد می‌کند (Soylu et al., 2017).

اگرچه تاکنون مطالعاتی در مورد تأثیر آبیاری قطره‌ای (Abbas et al., 2020; Hussain et al., 2020) و سطح ایستابی کم عمق بر توزیع دما، رطوبت و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (Alkhaier et al., 2012; Kollet and Maxwell, 2008; Mengistu et al., 2018) انجام گرفته است، اما مطالعات مربوط به بررسی تأثیرات آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر کنترل شوری حاصل از سفره‌های آب زیرزمینی کم عمق شور

سفره آب زیرزمینی می‌شوند. این امر در نهایت سبب شور شدن فزاینده خاک‌ها می‌شود (Yu et al., 2010).

در شرایط وجود شوری خاک، آبیاری قطره‌ای مزایای زیادی برای کنترل نمک در منطقه ریشه نسبت به سامانه‌های آبیاری غرقابی، جوی-پشته‌ای و بارانی نشان داده است (Hanson & May, 2004). مطالعات در مورد شوری خاک‌های تحت آبیاری قطره‌ای نشان می‌دهد که شوری خاک در نزدیکی قطره‌چکان‌ها کم و در نزدیکی سطح خاک بین نوارهای آبیاری بیشترین مقدار را داراست (Ibrahim et al., 2016; Abdoli et al., 2022). بنابراین، آبیاری قطره‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل ایجاد ناحیه‌ای با شوری کم در منطقه فعال ریشه و ارتقا عملکرد گیاه سودمند ارزیابی شده است (Dagdelen et al., 2009; Hanson and May, 2004).

ذرت یکی از محصولات اصلی کشت شده در خوزستان است که همواره با تنش‌های آبی، دمایی و شوری روبه‌رو بوده است. همچنین گزارش شده است که ذرت نیاز آبی بالایی دارد و نسبت به تنش شوری نسبتاً حساس است (Stone et al., 2001; Grieve et al., 2012). مطالعات نشان داده که تحت آبیاری قطره‌ای با پتانسیل ماتریک بالاتر از ۵۰- کیلو پاسکال، تنش شوری عامل اصلی کاهش عملکرد ذرت (نسبت به تنش آبی) است (Zhang et al., 2021). بنابراین آبیاری قطره‌ای به همراه کنترل پتانسیل ماتریک خاک و تغییرات رطوبت خاک را می‌توان راهکار مناسبی برای کاهش تنش شوری در نظر گرفت (Soylu et al., 2017). رشد گیاه ممکن است در اثر تنش آبی و یا تنش شوری کاهش یابد، اگر اثر تنش آبی و شوری به دو فاز ۱ و ۲ تقسیم شود تنش شوری در ابتدا (فاز ۱) علائمی کاملاً شبیه به تنش خشکی نشان می‌دهد (Hütsch et al., 2015; Zhang et al., 2020). بنابراین توسعه گیاه باید در یک دوره رشد نظارت شود تا اثرات تنش آبی (فاز ۱) از اثرات مستقیم شوری (فاز ۲) تمیز داده شود (Shahzad et al., 2012). زنانگ و همکاران طی پژوهشی اثر تنش خشکی و شوری را بر گیاه ذرت بررسی کردند و نشان دادند تنش شوری بیش از تنش خشکی بر کاهش عملکرد ذرت مؤثر است. در این پژوهش با در

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش آزمایش‌ها در بهار و تابستان ۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقات کشاورزی شماره ۲ دانشگاه شهید چمران اهواز واقع در ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی، ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی، در ارتفاع ۲۲/۵ متر از سطح دریا با اقلیم نیمه‌خشک انجام شد. این منطقه دارای تابستان‌های گرم و طولانی و زمستان‌های کوتاه و معتدل است (طبق روش آمبرژه، آب‌وهوای این منطقه نیمه بیابانی است). کلیه داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای این پژوهش به صورت ساعتی در ایستگاه آزمایشی هواشناسی واقع در مزرعه تحقیقاتی جمع‌آوری شد. میانگین و بیشینه دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی هوا و بارندگی ماهانه در جدول ۱ آمده است.

و همچنین رشد و عملکرد گیاه ذرت اندک بوده است. در منطقه‌ای مانند خوزستان سطح بالای آب زیرزمینی شور مشکلات غیرقابل‌انکاری را بر کشاورزی منطقه داشته است (Abdoli et al., 2017; Abdoli et al., 2022). درک بهتر چگونگی تأثیر تنش شوری ناشی آب‌های زیرزمینی شور کم‌عمق بر جریان آب و املاح و عملکرد آبیاری قطره‌ای در توزیع شوری خاک و متعاقباً عملکرد گیاه ضروری است؛ بنابراین در این پژوهش طی دو فصل زراعی بهار و تابستان، گیاه ذرت تحت دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در لایسیمتر و در شرایط مزرعه و با حضور سطوح ایستابی با دو عمق ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر با اهداف ذیل کشت شد. مطالعه توزیع شوری و رطوبت در طی آزمایش، ۲- بررسی عملکرد گیاه ذرت، ۳- بررسی توزیع ریشه ۴- انتخاب بهترین روش آبیاری در شرایط سطح ایستابی شور و کم‌عمق برای گیاه ذرت.

جدول ۱- پارامترهای هواشناسی منطقه مورد آزمایش در طول فصل‌های رشد ذرت

پارامتر هواشناسی	کشت بهار			کشت تابستان		
	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد
میانگین دما T_{mean} (سانتی‌گراد)	۱۳/۱	۱۶/۴	۲۲/۲	۲۷/۹	۳۲	۳۰
دمای حداکثر T_{max} (سانتی‌گراد)	۲۵/۹	۳۰/۱	۳۷/۷	۴۵/۷	۴۹	۴۸
میانگین رطوبت نسبی RH_{mean} (درصد)	۵۸	۴۷	۳۳	۱۹	۱۶	۱۷
سرعت باد در ارتفاع دو متری (U_2) (متر بر ثانیه)	۳/۹	۳/۷	۷/۸	۵/۱	۴/۵	۴/۸
بارندگی Rainfall (میلی‌متر)	۳۲	۲۴	۱	۰	۰	۰

درصد رس، ۳۰ درصد سیلت و ۴۴ درصد شن) پر شدند. جرم مخصوص ظاهری خاک لایسیمترها ۱/۴۵ گرم بر سانتی مترمکعب بود. عمق آب زیرزمینی در لایسیمترها با استفاده از بطری ماریوت^۱ که با استفاده از یک لوله انعطاف‌پذیر به انتهای

آماده‌سازی لایسیمترها

در این پژوهش از لایسیمترهای پلی‌اتیلنی به قطر داخلی ۸۰ سانتی‌متر و عمق ۱۲۰ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۱). کف لایسیمترها با فیلتر شنی تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری پر شد. سپس، لایسیمترها به‌طور همگن با خاک لوم (خاک طبیعی مزرعه با ۲۶

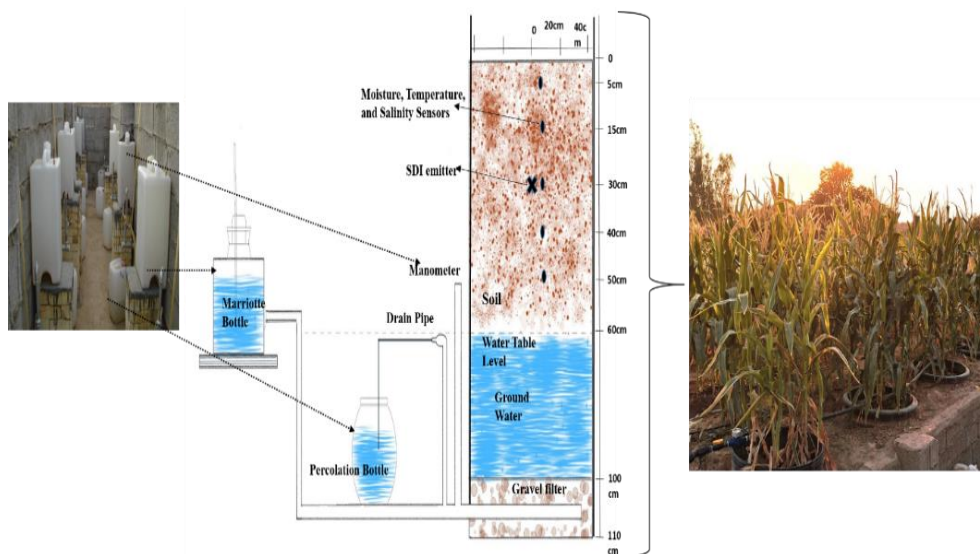
¹ Marriotte

جهت بررسی اثر سیستم آبیاری بر کنترل شوری نیمرخ خاک و رشد گیاه ذرت استفاده شد. در نتیجه ۴ سناریوی مورد مطالعه شامل از SDI100، DI100، DI60، SDI60 و SDI100 بودند. قطره‌چکان‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) در عمق ۳۰ سانتی‌متر از سطح خاک نصب گردید. در هر دو روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) و قطره‌ای سطحی (DI)، میانگین دبی قطره‌چکان ۴ لیتر بر ساعت بود. آبیاری هرروز از ساعت ۹ صبح شروع و به مدت یک ساعت انجام می‌شد. همچنین عمق آب آبیاری مورد نیاز با استفاده از تست تبخیر کلاس A و از میزان تبخیر صورت گرفته در روز قبل برآورد می‌شد. در واقع بر این اساس مقدار آب مصرفی برای همه تیمارها در طول آزمایش تقریباً معادل ۶۵۰۰ مترمکعب در هکتار در فصل تابستان و ۶۶۰۰ مترمکعب در هکتار در فصل بهار بوده است. ضریب تست در این تحقیق ۰/۸۲ در نظر گرفته شد و ضرایب گیاهی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شد (برزگری، ۱۳۸۶).

هر لایسیمتر متصل بود ثابت نگه‌داشته می‌شد. دو لوله زهکشی (برای جمع‌آوری آب نفوذی) و لوله ماریوت (برای تأمین آب‌های زیرزمینی شور) به‌طور مشترک برای برقراری سطح ایستابی در سطح موردنظر مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). بطری ماریوت برای تخمین تبخیر با استفاده از روش بیلان آب بر اساس روش رز و همکاران استفاده شد (Rose et al., 2005). بدین منظور ارتفاع آب ماریوت‌ها هرروز کنترل و میزان آب از دست رفته ثبت می‌شد. همچنین برای کنترل مقدار آبیاری، لایسیمترها به پمپ، مخزن ۱۰۰۰ لیتری، شیر کنترل، کنتور آب و فشارسنج مجهز بودند. شوری آب‌های زیرزمینی ۱۰ دسی زیمنس بر متر در نظر گرفته شد (Karimi et al., 2011). در این پژوهش ۴ سناریوی مختلف از عمق سفره آب زیرزمینی و سیستم آبیاری مورد مطالعه قرار گرفت. دو عمق سفره آب زیرزمینی شامل عمق‌های ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از سطح خاک برای مطالعه اثر عمق سفره آب زیرزمینی در لایسیمترها اعمال شدند. دو روش DI و SDI نیز

جدول ۲- ضرایب گیاهی در دوره‌های مختلف رشد گیاه ذرت

کشت تابستانه	کشت بهاره	ضرایب گیاهی
۰/۵	۰/۴۵	دوره ابتدایی رشد
۱/۱۵	۱/۰۵	دوره میانی رشد
۰/۷۵	۰/۷	دوره پایانی رشد



شکل ۱- نمای کلی لایسیمترهای و بطری ماریوت

کاشت ذرت و کود دهی

پس از آماده‌سازی لایسیمترها بذرها را ضد عفونی شده ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۳ (SC 703) با قوه نامیه بالای ۹۰ درصد در کشت بهاره (اسفندماه ۱۳۹۸) و تابستانه (مردادماه ۱۳۹۹) در خاک کاشته شدند. پس از رشد بوته‌ها تراکم آن‌ها به چهار بوته در هر لایسیمتر کاهش داده شد. بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی خاک نیتروژن به مقدار ۲۷۳ کیلوگرم در هکتار در کشت تابستانه و ۲۵۲ کیلوگرم در هکتار در کشت بهاره به خاک اضافه شد. کود اوره نیتروژن به صورت پایه در آبیاری دوم و کود اوره معمولی در سه تقسیط مساوی، تقسیط اول قبل از آبیاری دوم، تقسیط دوم در مرحله چهار تا شش برگه شدن گیاه و تقسیط سوم قبل از ظهور گل تاجی (گل نر) به گیاه داده شد. همچنین مقدار ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاس و

فسفات تریپل قبل از کشت به خاک اضافه و تا عمق ۱۰ سانتی‌متر مخلوط شد.

اندازه‌گیری رطوبت و شوری خاک

در طی آزمایش رطوبت و هدایت الکتریکی نیمرخ خاک به ترتیب با سنسورهای VsensHU98 و VsensEC98 ساخت ایران (Venda Farahoosh, Iran) در عمق‌های ۵، ۱۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر نیمرخ خاک و در دو فاصله افقی ۵ و ۳۵ سانتی‌متر از قطره‌چکان (به دلیل عدم برخورد با دیواره) اندازه‌گیری شد. این سنسورها به هنگام پر کردن لایسیمترها با خاک در عمق‌های مورد نظر قرار داده شدند. به هر نقطه (Nod) اندازه‌گیری شماره‌ای اختصاص داده شد که در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- مختصات قرارگیری سنسورهای اندازه‌گیری رطوبت و هدایت الکتریکی

شماره نقطه	مختصات نقطه	شماره نقطه	مختصات نقطه
Nod ۱	x=۵; y=۵	Nod ۶	x=۳۵; y=۵
Nod ۲	x=۵; y=۱۵	Nod ۷	x=۳۵; y=۱۵
Nod ۳	x=۵; y=۳۰	Nod ۸	x=۳۵; y=۳۰
Nod ۴	x=۵; y=۴۰	Nod ۹	x=۳۵; y=۴۰
Nod ۵	x=۵; y=۵۰	Nod ۱۰	x=۳۵; y=۵۰

تمامی لایسیمترها به طور کامل توسط آب آبیاری غیر شور ۱/۶ EC= دسی زیمنس بر متر شسته شدند.

بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

منحنی رطوبتی خاک با استفاده از جعبه شنی و صفحه فشاری اندازه‌گیری شد. سپس در برنامه RETC مدل وان-گنوختن (Van Genuchten, 1980) بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شد و با روش حداقل مربعات خطا پارامترهای مدل به دست آمد.

تمام سنسورها به یک دیتالاگر (Vaglog24) ساخت ایران (Venda Farahoosh) متصل و مقادیر رطوبت، دما و شوری خاک را در فواصل زمانی ده دقیقه‌ای اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها برای هر ساعت ثبت گردید. همه سنسورها قبل از شروع آزمایش به صورت جداگانه در مزرعه و آزمایشگاه واسنجی شدند. واسنجی سنسور محتوای رطوبت خاک و هدایت الکتریکی به ترتیب دقتی برابر با ۳٪ و ±۰/۷۵ دسی زیمنس بر متر را نشان دادند. شایان ذکر است که قبل از شروع آزمایش، برای ایجاد شرایط یکنواخت و از بین بردن توزیع شوری غیریکنواخت در خاک،

آبیاری (میلی‌متر)، Re باران مؤثر (میلی‌متر)، Gc مشارکت آب زیرزمینی در تبخیر و تعرق گیاه (میلی‌متر)، D مقدار زهاب خروجی (میلی‌متر). ΔW تغییرات رطوبت خاک در ناحیه ریشه (میلی‌متر) در رابطه فوق، Gc از کاهش مقدار آب در مخزن بطری ماریوت قرائت می‌شود. D مقدار آب زهکشی شده یا مقدار آبی است که در ظرف جمع‌آوری زهاب مربوط به هر لایسیمتر جمع‌آوری می‌گردد (Karimi et al., 2011).

بررسی ویژگی‌های گیاهی

برای اندازه‌گیری سطح برگ از زمان استقرار کامل گیاه تا زمان برداشت با فواصل زمانی ۱۵ روزه، سه برگ از قسمت میانی دو گیاه از هر لایسیمتر انتخاب و سطح برگ برای هر تیمار اندازه‌گیری شد. سطح برگ با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Moll and Kamparth, 1977)

$$LA = 0.75L \times W \quad (2)$$

که در آن LA ، L و W به ترتیب سطح برگ، طول برگ و پهن‌ترین قسمت عرض برگ است. شاخص بهره‌وری مصرف آب، نسبت عملکرد محصول به مقدار آب مصرفی به‌منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد گیاه و آب مصرفی از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$WP = Gw/W_1 \quad (3)$$

که در آن WP ؛ بهره‌وری آب (کیلو گرم بر مترمکعب)، Gw عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) و W_1 آب مصرفی (مترمکعب در هکتار) است. برای بررسی ریشه گیاه در هر مرحله از رشد گیاه ذرت، نمونه‌های ریشه آن با استفاده از یک برش عمودی خاک به روش لی و همکاران جمع‌آوری شد (Li et al., 2017). نمونه‌ها در فواصل ۵ سانتی‌متر تا عمق ۵۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شد و برای عمق بیش از ۵۰ سانتی‌متر خاک، نمونه برداری ریشه در فواصل ۱۰ سانتی‌متر انجام شد؛ نمونه برداری تا عمقی صورت گرفت که دیگر هیچ ریشه‌ای در خاک پیدا نشد.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} \quad (1)$$

که در آن θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع خاک، h پتانسیل ماتریک خاک، α ، n و m پارامترهای شکل هستند. با استفاده از برنامه RETC بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی برازش داده شدند و پارامترهای معادله وان-گونختن به دست آمدند. هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک $K(h)$ از رابطه زیر به دست آمد.

$$K(h) = K_s \times \frac{\left[1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{\frac{1}{n-1}}\right]^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{\frac{n-1}{2n}}} \quad (2)$$

که در آن K_s هدایت هیدرولیکی غیراشباع ($L.T^{-1}$) و h با فشار (L) هست.

توزیع دو بعدی رطوبت و شوری خاک

توزیع دو بعدی رطوبت و شوری با استفاده از نرم‌افزار Surfer 8.0 مورد بررسی قرار گرفت. توزیع دو بعدی رطوبت در مرحله‌ای از رشد گیاه (در روز ۸۹ از دوره ۱۱۵ روزه کاشت ذرت و در مرحله رسیدگی^۱) ترسیم شد که رشد ریشه حداکثر بوده و بیشترین میزان جذب آب را دارد. همچنین توزیع دوبعدی شوری در پایان فصل در هر چهار سناریو SDI_{100} ، SDI_{60} ، DI_{100} ، DI_{60} رسم گردید.

اندازه‌گیری مقدار تبخیر و تعرق

مقدار تبخیر و تعرق واقعی گیاه در هر لایسیمتر به‌صورت زیر است محاسبه گردید.

$$ETA = I + Re + Gc - D \pm \Delta W \quad (1)$$

که در آن ETA تبخیر و تعرق واقعی گیاه در شرایط تنش شوری و یا وجود آب زیرزمینی کم عمق (میلی‌متر)، I مقدار آب

¹ Maturation Stage

در این پژوهش تأثیر دو روش آبیاری DI و SDI، دو عمق سفره آب زیرزمینی شور (بدون حضور سطح ایستابی و عمق‌های ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری) به مدت دو فصل کاشت (بهاره و تابستانه) بر ویژگی‌های رشدی و عملکرد گیاه ذرت و توزیع رطوبت و شوری نیمرخ خاک مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل روش آبیاری در دو سطح (آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی)، سطح ایستابی در سه سطح (صفر، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری) و شوری خاک در عمق و فواصل مختلف لایسیمتر در ۱۰ سطح (nod=1, 10, ..., 2) بودند. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن انجام شد و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار EXCEL 2016 استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ آمده است. بافت خاک لومی و رطوبت ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی و رطوبت قابل استفاده به ترتیب ۱۵، ۹ و ۶ درصد بود.

جهت بررسی مورفولوژی ریشه و اندازه‌گیری عمق و عرض توسعه ریشه در هشت مرحله و با فواصل هر ۱۰ روز یکبار در طول دوره رشد و هر مرحله ۳ گیاه در تمامی تیمارها مورد ارزیابی قرار گرفت. حفاری با استفاده از بیلچه انجام شد و عمق و عرض‌های رشد ریشه در هر تیمار به‌عنوان معیار برای ارزیابی مدل‌های توسعه ریشه انتخاب شد. خاک چسبیده به گیاه با غوطه‌ور شدن در آب با دقت حذف شد و خاک متلاشی شد و سپس مشاهدات انجام شد. عمق ریشه‌زایی از ناحیه یقه تا نوک عمیق‌ترین ریشه اندازه‌گیری شد و برحسب سانتی‌متر بیان شد. پس از شستشو، وزن تر و حجم ریشه‌ها به ترتیب با ترازوی دیجیتالی با دقت یک‌دهم گرم و استوانه مدرج اندازه‌گیری شدند. طول و تراکم ریشه با روش خطی شده، اندازه‌گیری شد (Sampathkumar et al., 2012). ریشه‌های تر بعد از چند ساعت قرار گرفتن در هوای آزاد به داخل آون منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. ریشه‌های خشک شده با ترازو دیجیتالی با دقت یک‌صدم گرم توزین شدند. در نهایت درصد وزنی ریشه‌های موجود در هر لایه و ستون از خاک محاسبه شد.

طرح آزمایشی و تجزیه آماری داده‌ها

جدول ۴- ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد مطالعه

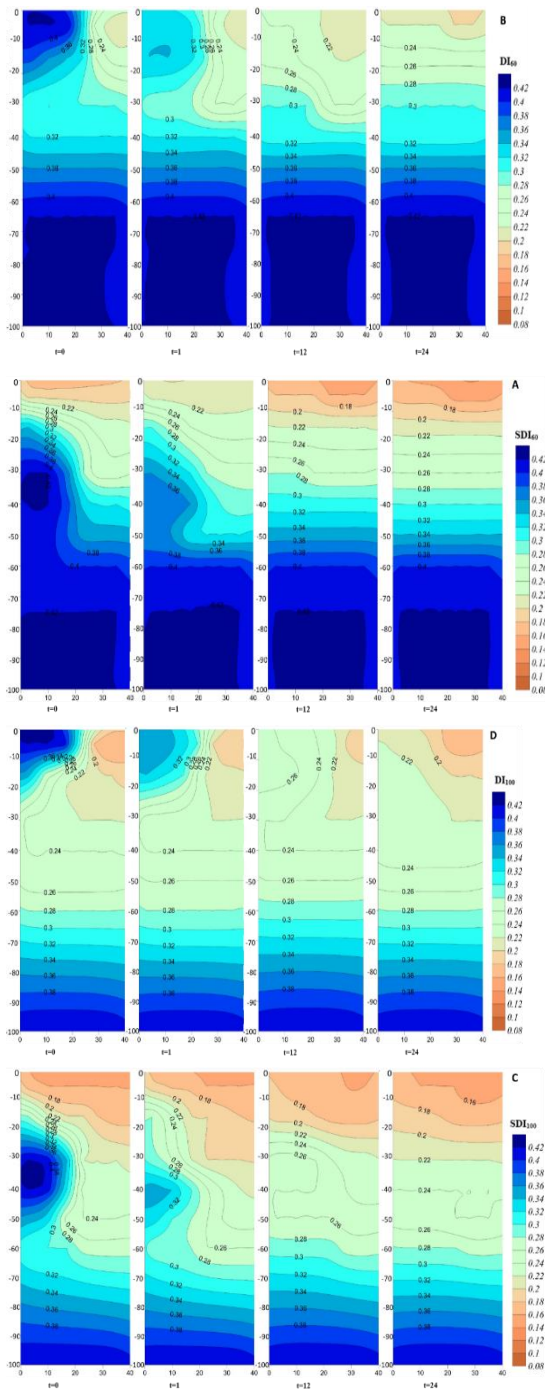
نوع بافت	شن	سیلت	رس	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی	جرم مخصوص ظاهری	Ks	α	Θ_s	Θ_f
			درصد	گرم بر سانتی مترمکعب	سانتی‌متر در روز			$(\text{سانتی‌متر})^{-1}$		
لوم	۴۴	۳۰	۲۶	۱۵	۹	۱/۴۵	۴۲	۰/۰۵	۰/۴۲	۰/۰۶۵۳

جدول ۵- ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه

نیترژن کل	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	Na ⁺	(Ca+Mg) ²⁺	ECe	SAR	اسیدیته
درصد	میلی‌گرم بر کیلوگرم	میلی‌گرم بر کیلوگرم	میلی‌اکی‌والان بر لیتر	دسی‌زیمنس بر متر			
۰/۱۷۸	۳۴۲/۴	۱۱۰/۷	۷/۰۶	۱۰/۷	۱/۶	۳/۲۹	۷/۶

تغییرات دو بعدی مقدار رطوبت خاک

محتوی رطوبت این نقاط نشان می‌دهد که آب از منابع مختلفی به این نقاط می‌رسد و لزوماً آب آبیاری نیست.



شکل ۲- توزیع دوبعدی رطوبت خاک در ۴ سناریوی A (SDI₆₀)، B (DI₆₀)، C (SDI₁₀₀)، D (DI₁₀₀) و زمان‌های t=0 (انجام آبیاری)، t=1 (یک ساعت بعد از آبیاری)، t=12 (۱۲ ساعت بعد از آبیاری) و t=24 (قبل از شروع آبیاری)

در شکل ۲ توزیع دوبعدی رطوبت خاک آمده است. در این شکل توزیع دو بعدی رطوبت از سطح خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری و فاصله صفر تا چهل سانتی‌متری از قطره‌چکان در ۴ سناریوی مورد بررسی (DI100، SDI100، DI60، SDI60) در چهار زمان t=0 (انجام آبیاری)، t=1 (یک ساعت بعد از آبیاری)، t=12 (۱۲ ساعت بعد از آبیاری) و t=24 (قبل از شروع آبیاری) ترسیم شده است. نتایج رطوبت ثبت‌شده نشان می‌دهد که توزیع رطوبت در خاک کشت شده وابسته به توزیع ریشه گیاه و تبخیر و تعرق بوده (Chen et al., 2020) که توزیع ریشه نیز مستقیماً از روش آبیاری و شرایط رطوبتی خاک تأثیر می‌گیرد (Sampathkumar et al., 2012). به خاطر تعادل رطوبتی اولیه خاک در (t=0) و وجود رطوبت در لایه‌های زیرسطحی خاک، در هر ۴ سناریو، با افزایش عمق، رطوبت خاک افزایش یافته است و در ادامه با انجام آبیاری رطوبت خاک در اطراف قطره‌چکان‌ها افزایش می‌یابد. رطوبت خاک پس از هر مرحله از آبیاری به مقدار زیاد افزایش می‌یابد و به تدریج بر اثر دو فاکتور زهکشی (که بیشترین مقدار را در ابتدای فصل کشت دارد که توسعه ریشه کمتر است) و جذب ریشه (که بیشترین مقدار را در مرحله بلوغ گیاه دارد) کاهش می‌یابد. بیشترین میزان درصد رطوبت مربوط به اطراف قطره‌چکان‌ها و نزدیک به سطح ایستابی است. همچنین میزان رطوبت در سطح در DI بیش از رطوبت عمقی بود که با فاصله از قطره‌چکان‌ها به سمت عمق کاهش پیدا کرده است. این در حالی است که SDI میزان رطوبت بیشتری در عمق داشته است که بیشتر متأثر از آب آبیاری است تا سطح ایستابی کم‌عمق. رطوبت خاک پس از هر بار آبیاری تا فاصله عرضی تقریباً ۲۵ سانتی‌متری از قطره‌چکان تحت تأثیر قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده سطح پیاز رطوبتی است. در این خاک به دلیل درصد بالای شن و هدایت هیدرولیکی بالای خاک، نفوذ عمقی آب بیشتر از گسترش عرضی است. همین امر باعث شده است که نقاط حاشیه‌ای لایسیمتر کمتر از آبیاری صورت گرفته تأثیر بپذیرد و تقریباً رطوبت ثابتی را در طول دوره آبیاری داشته باشد.

شست‌وشوی املاح و خارج کردن از نیمرخ لایسیمتر شود. از طرفی در مقابل، صعود کاپیلاری و جذب آب توسط ریشه گیاه سبب حرکت آب زیرزمینی شور و انتقال املاح به سمت لایه‌های سطحی خاک و افزایش شوری شود. حال آنکه تغییرات شوری در نیمرخ خاک تحت آبیاری قطره‌ای با حضور سطح آب زیرزمینی شور و کشت گیاه نیازمند بررسی بیشتر است؛ بنابراین تغییرات شوری خاک در نقاط مختلف روش‌های آبیاری و در حضور سفره آب زیرزمینی (۱۰۰ سانتی‌متر، ۶۰ سانتی‌متر و بدون حضور سطح ایستابی) و شوری پایان فصل خاک مورد آنالیز آماری قرار گرفت؛ که در جدول ۷ نتایج تجزیه واریانس آمده است. طرح آماری مورد استفاده فاکتوریل با سه فاکتور بود که سیستم آبیاری در دو سطح، سطح سفره آب زیرزمینی در سه سطح و نقاط اندازه‌گیری عمق خاک در ۱۰ سطح (nod1-nod 10) به‌عنوان فاکتورها در نظر گرفته شدند. نتایج تجزیه واریانس در جدول ۷ آمده است. نتایج تجزیه واریانس دو فصل نشان می‌دهد اثر اصلی روش آبیاری، سطح سفره آب زیرزمینی و موقعیت اندازه‌گیری شوری خاک بر مقدار شوری پروفیل خاک در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده است. اثر متقابل روش آبیاری و سطح سفره آب زیرزمینی نیز معنی‌دار شده است و این به آن معنی است که حجم املاح وارد شده به خاک به‌طور متوسط در هر شش سناریو با یکدیگر برابر نیست و این به دلیل وجود تیمار بدون حضور سطح ایستابی است. از طرفی چون اثر متقابل سه‌گانه این دو عامل با موقعیت اندازه‌گیری شوری معنی‌دار شده است، می‌توان نتیجه گرفت که توزیع شوری به‌طور معنی‌داری متفاوت است. در این پژوهش به دلیل زیاد بودن تعداد اثرات متقابل، به‌جای نمودار مقایسه میانگین، توزیع شوری پایان فصل شش سناریوی (SDI100, SDI60, SDINone, DI100, DI60, DINone) در شکل ۳ آورده شده است تا اثرات سناریوهای مورد بررسی بهتر مشاهده گردد. شایان‌ذکر است که در این شکل میانگین سه تکرار برای نقاط اندازه‌گیری شده مورد استفاده قرار گرفته است. از طرفی به‌منظور بررسی تأثیر زمان کاشت و فصل زراعی بر شوری نیمرخ خاک بین داده‌های شوری خاک در دو فصل آزمون T-test انجام

همان‌طور که مشاهده می‌شود زمانی که سفره آب زیرزمینی در عمق ۶۰ سانتی‌متری قرار دارد رطوبت این نقاط بیشتر است و از این رو می‌توان گفت که منشأ رطوبت نقاط حاشیه لایسیمتر عمدتاً سفره آب زیرزمینی است. با مقایسه دو روش آبیاری DI و SDI، مشاهده می‌شود در DI عمق زیر ۴۰ سانتی‌متر نوسانات رطوبت خاک کم بوده و نقش کمتری نیز در تأمین نیاز رطوبتی گیاه ذرت دارد، اما در SDI تا عمق ۷۰ سانتی‌متری رطوبت خاک از آبیاری تأثیر پذیرفته و می‌تواند در فراهمی آب برای گیاه مؤثر باشد.

اورن و همکاران گزارش دادند که پهن‌ترین الگوی توزیع آب مربوط به قطره‌چکان‌های قرار گرفته در عمق ۳۰ سانتی‌متری است (Oren et al., 1999). نتایج نشان داده‌شده با نتایج تحقیقات اسکاگز و همکاران و سلیم و همکاران (Skaggs et al., 2004; Selim et al., 2013) مطابقت دارد. قبل از هر مرحله آبیاری رطوبت در اطراف قطره‌چکان کاهش می‌یابد که کمترین مقدار رطوبت را در این منطقه در طول دوره داراست.

همچنین قبل از هر آبیاری کمترین مقدار رطوبت به دلیل جذب ریشه در اطراف قطره‌چکان‌ها مشاهده می‌شود. پس از هر بار آبیاری مقدار رطوبت خاک در DI در عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر به‌سرعت کاهش می‌یابد که این سبب شکل غیریکنواخت توزیع رطوبت (شکل ۲) در نقاط خشک‌تر مثل حاشیه پیاز رطوبتی و در نقاط نزدیک به سطح که آبیاری صورت می‌گیرد می‌شود. در واقع رطوبت خاک ارتباط مستقیمی با سیستم رشد ریشه دارد و در مناطق با تمرکز بیشتر ریشه، تخلیه رطوبتی بیشتر صورت می‌گیرد.

تأثیر روش آبیاری و عمق آب زیرزمینی بر شوری

خاک

در این آزمایش املاح خاک از دو منبع آب‌شور زیرزمینی و آب آبیاری غیر شور مطابق جدول ۶ (کیفیت آب زیرزمینی و آب آبیاری) تأمین شده‌اند. در روش‌های آبیاری سنتی مانند آبیاری نشتی انتظار می‌رود جریان آب ورودی در نتیجه آبیاری موجب

شد که نشان داد میانگین شوری در دو فصل تفاوت معنی‌داری نداشت.

جدول ۶- کیفیت آب زیرزمینی و آب آبیاری

SAR	کاتیون‌ها		انیون‌ها			pH	EC	مشخصات نمونه
	(Ca+Mg) ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻			
	میلی‌اکی‌والان در لیتر			دسی‌زیمنس بر متر				
۳/۵۲	۱۱/۴	۸/۴	۲/۸	۱۱	۶/۲	۷/۸	۱/۶	آب آبیاری
۱۵/۶	۴/۳	۲۳	۱/۵	۳۳/۵	۲۴	۷/۴	۱۰	آب زیرزمینی

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس اثر سطح ایستابی، روش آبیاری و عمق بر شوری خاک در پایان دو فصل بهار و تابستان

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	میانگین مربعات
		کشت تابستانه	کشت بهاره
بلوک	۲	۱/۹۷	۱/۱
سطح آب زیرزمینی	۲	۳۳۶/۳**	۲۲۷/۶***
روش آبیاری	۱	۱۵۵/۸**	۲۴۱/۹***
سطح آب زیرزمینی* روش آبیاری	۲	۴۰/۴۲**	۶۲/۴۹***
نقاط نمونه‌برداری	۹	۲۵۶**	۱۸۶/۳۹***
نقاط نمونه‌برداری* سطح آب زیرزمینی	۱۸	۶۳/۲**	۴۵**
نقاط نمونه‌برداری* روش آبیاری	۹	۳۵/۱**	۴۸**
نقاط نمونه‌برداری* سطح آب زیرزمینی* روش آبیاری	۱۸	۱۶/۴۲**	۱۹/۲۲***

شوری اطراف قطره‌چکان‌ها تا ۱/۶ دسی‌زیمنس بر متر و در سطح خاک تا ۴ دسی‌زیمنس بر متر در آبیاری زیرسطحی بالا رفته است؛ بنابراین، در صورت کاهش شوری آب آبیاری مقدار نمک در سطح خاک کاهش می‌یابد؛ اما بخش بسیاری از املاح رسیده به سطح خاک مخصوصاً در نواحی حاشیه‌ای لایسمترها (فاصله ۴۰ سانتی‌متری) از سفره آب زیرزمینی منشأ گرفته است. بالا آمدن سفره آب زیرزمینی املاح بسیاری را وارد لایه‌های سطحی می‌کند که بهره‌وری آبشویی توسط سیستم آبیاری را کاهش می‌دهد. در این شرایط با انتقال منبع آبشویی به لایه‌های پایین‌تر خاک، به دلیل ورود آب غیر شور به خاک، مانند یک مانعی در برابر آب شور زیرزمینی عمل می‌کند و اجازه بالا آمدن املاح را نمی‌دهد (Hanson et al., 2008; Abdoli et al., 2022). نتایج حاصله از این تحقیق با نتایج اورون و همکاران (Oron et al., 2022) برای آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

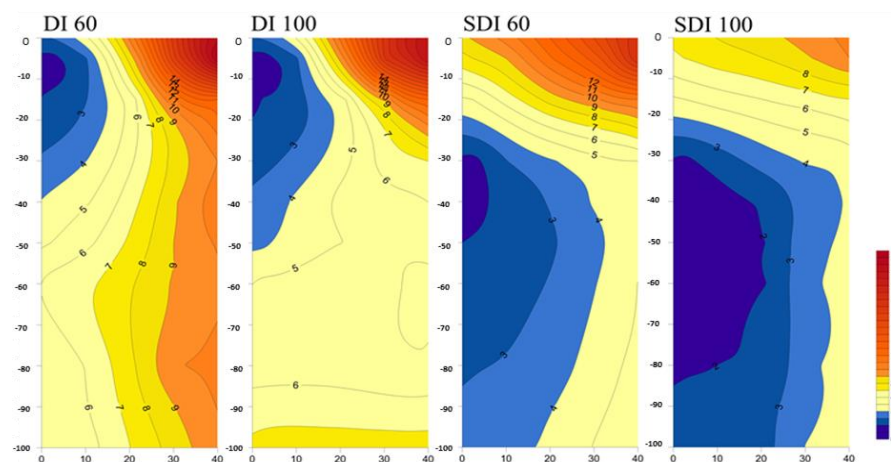
توزیع دو بعدی شوری خاک در پایان فصل زراعی بهاره و تابستانه در شکل ۳ آمده است؛ همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد دامنه آبشویی قطره‌چکان در SDI بیشتر از DI است. آبشویی عرضی تا حدود ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر به ترتیب در هر دو تیمار از سیستم آبیاری DI و SDI و آبشویی عمقی برای چهار سناریوی SDI100، DI100، SDI60 و DI60، ۵۰، ۱۰۰ و ۴۰ سانتی‌متر مشاهده شد.

بیشترین میزان آبشویی در زیر قطره‌چکان انجام شده است؛ اما مقداری آبشویی نیز در بالای قطره‌چکان‌ها اتفاق افتاده که در شکل‌های مربوط به SDI قابل مشاهده است. با این وجود در این سیستم‌ها نیز نمک در سطح خاک تجمع می‌یابد. بخشی از شوری و نمک تجمع یافته در حاشیه پیاز رطوبتی و در سطح خاک به‌طور قطع متأثر از شوری آب آبیاری (۱/۶ دسی‌زیمنس بر متر) بوده به این دلیل که در تیمار بدون حضور سطح ایستابی

(Hanson and May, 2004) تطابق دارد.

(1999، برای آبیاری قطره‌ای سطحی سلیم و همکاران (Selim

et al., 2013) و هانسون و می برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی



شکل ۳- توزیع دو بعدی شوری پایان فصل برای ۴ سناریوی DI_{100} ، SDI_{100} ، DI_{60} ، SDI_{60}

شده است). نوع روش آبیاری نیز تأثیری معنی‌دار بر ویژگی‌های رشدی و عملکردی گیاه ذرت داشته است و با تغییر آبیاری قطره‌ای از سطحی به زیرسطحی شرایط برای رشد گیاه مساعدتر شده و عملکرد گیاه افزایش یافته است. این می‌تواند احتمالاً به دلیل اثر روش آبیاری بر توزیع شوری خاک و کاهش تبخیر سطحی باشد. نتایج اثر متقابل سطح ایستابی و روش‌های آبیاری نشان می‌دهد که در کدام فصل رشد در چه عمق آب زیرزمینی و چه روش آبیاری گیاه بهترین عملکرد را داشته است. همچنین نشان می‌دهد که با تغییر روش آبیاری در یک عمق سفره آب زیرزمینی خصوصیات رشدی گیاه چگونه است. طبق جدول ۸ گیاه ذرت در روش آبیاری زیرسطحی وقتی که عمق سفره آب زیرزمینی ۱۰۰ سانتی‌متر است بهترین عملکرد را دارد. همچنین حتی با بالا آمدن سطح سفره آب زیرزمینی تا عمق ۶۰ سانتی‌متر، در بیشتر خصوصیات اندازه‌گیری شده مانند عملکرد، بهره‌وری مصرف آب، شاخص سطح برگ، طول ریشه و ارتفاع گیاه، آبیاری زیرسطحی نتیجه بهتری حاصل شده است. این نتیجه در هر دو فصل زراعی نیز به‌دست آمده است. در مقایسه با تیمار بدون سطح ایستابی (شاهد) که شرایط بهینه و بدون تنش شوری است، تیمار SDI_{100} بهترین عملکرد را در تمامی

تأثیر روش آبیاری و عمق آب زیرزمینی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و عملکرد گیاه ذرت

به‌منظور بررسی تأثیر روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی و عمق آب زیرزمینی بر عملکرد گیاه ذرت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی اجرا شد که نتایج در جدول ۸ آمده است. فاکتورها شامل روش‌های آبیاری در دو سطح و سطح ایستابی در سه سطح در نظر گرفته شدند. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد عمق سفره آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از فاکتورهای مورد بررسی بر بسیاری از خصوصیات رشدی و عملکردی گیاه در سطح پنج درصد تأثیر معنی‌داری داشته است. مقدار عملکرد با بالا آمدن عمق سفره آب زیرزمینی کاهش یافته است؛ زیرا حضور املاح در منطقه رشد ریشه با کاهش مقدار پتانسیل اسمزی (منفی‌تر شدن) باعث افزایش انرژی مصرفی گیاه برای جذب آب شده و لذا رشد گیاه با محدودیت مواجه شده است. سایر ویژگی‌های رشدی گیاه نیز همین نتیجه را نشان داده است. عرض توسعه ریشه اما مستقیماً از سطح سفره آب زیرزمینی تأثیر معنی‌دار نپذیرفته است به طوری که توسعه عرضی ریشه به دلیل اثر کاهشی روش‌های آبیاری بر سطوح ایستابی بوده است (اثر متقابل سه‌گانه معنی‌دار

ایستابی وجود سطح ایستابی کم عمق گیاه را وادار به توسعه ریشه با اعماق و استفاده از استراتژی جایگزینی^۱ می کند (Soylu et al., 2017)؛ اما در شرایط وجود نمک در سطح ایستابی (بخصوص اگر بیش از تحمل گیاه به شوری باشد) اولویت کاهش شوری خاک است که نهایتاً سبب افزایش عملکرد گیاه می شود. مطالعات بسیاری نیز تأکید کرده است که بررسی تأثیر توأمان پتانسیل اسمزی و مکش ماتریک (رطوبت خاک) برای درک پاسخ بیولوژیک گیاه به شرایط شوری حائز اهمیت هست (Setia & Marschner, 2013). غلظت بالای نمک در ناحیه ریشه باعث کاهش پتانسیل اسمزی محلول خاک شده و در نتیجه باعث ایجاد تنش اسمزی در گیاهان می شود (Sheldon et al., 2017). در همین حال، با خشک شدن خاک (کاهش پتانسیل ماتریک)، لایه های آب در اطراف ذرات خاک نازک تر می شوند و در نتیجه آب به شدت روی سطوح نگه داشته می شود و در نتیجه جذب آب توسط گیاه کم می شود (Whalley et al., 2013). طی مطالعه ای ژانگ و همکاران تابع بهره‌وری مصرف آب محصول را محاسبه کردند و نشان دادند که عملکرد دانه با کاهش مصرف آب، در مقایسه با مقادیر پیشنهاد شده توسط مقاله FAO 66 (Steduto et al., 2012) کمتر کاهش پیدا کرد (Zhang et al., 2020). باین حال، ذرت که به خشکی بسیار حساس گزارش شده است (Farre et al., 2000)، احتمالاً کاهش عملکرد بیشتری با کمبود آب داشته باشد. همچنین مطالعات پلات و همکاران نشان داد که تحمل ذرت به شوری خاک ۳ تا ۶ دسی زیمنس بر متر است (Plaut et al., 2013)؛ بنابراین، می توان نتیجه گرفت که تنش آبی عامل اصلی کاهش عملکرد نبوده و تنش شوری عامل اصلی بوده است. در این پژوهش همچنین برای بررسی تأثیر دو فصل زراعی بهار و تابستان بر بهره‌وری مصرف آب و برخی ویژگی های مورفولوژیکی و عملکرد ذرت آزمون T-Test انجام شد که نتایج آن در جدول ۹ گزارش شده است. نتایج آزمون T-Test نشان می دهد که عملکرد گیاه ذرت، بهره‌وری مصرف آب، شاخص سطح برگ، طول ریشه و وزن تر گیاه در دو فصل در سطح پنج درصد باهم تفاوت

شاخص های مورد مطالعه داشته است. همچنین نتایج مقایسه میانگین ها نشان می دهد (جدول ۸) بیشترین میانگین عملکرد دانه در هر دو فصل کشت به تیمار SDI100 اختصاص داشته است. در فصل تابستان عملکرد دانه در تیمار SDI100 به ترتیب ۲۵، ۶ و ۷۱ درصد بیش از تیمار به ترتیب DI100، SDI60 و DI60 بود. در تیمار DI60 به دلیل شوری بیشتر عمق توسعه ریشه، کمترین عملکرد دانه مشاهده شد. عملکرد دانه در کشت بهاره احتمالاً به دلیل قرار گرفتن دوره گرده افشانی گیاه با دمای زیاد خردادماه (دمای بالای ۴۰ درجه سلسیوس) نسبت به کشت تابستانه کمتر بود. به همین جهت در خوزستان ذرت بهاره برای مصرف علوفه ای و ذرت تابستانه مصرف دانه ای دارد؛ اما باین حال آبیاری زیرسطحی سبب افزایش عملکرد گیاه نسبت به آبیاری سطحی در هر دو تیمار سطح ایستابی ۶۰ و ۱۰۰ سانتی متر گردید. کمبود آب در منطقه ریشه به واسطه شوری زیاد در مرحله رویشی و زایشی، تعداد دانه در مرحله پر شدن، وزن دانه را کاهش داده و متعاقباً سبب کاهش عملکرد دانه می شود (Oikeh, 1998). نتایج تجزیه واریانس نشان داد سطوح ایستابی و روش های آبیاری و همچنین برهمکنش متقابل هر کدام از این فاکتورها بر ماکزیمم شاخص سطح برگ معنی دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان می دهد که ماکزیمم شاخص سطح برگ در آبیاری زیرسطحی در هر دو تیمار سطح ایستابی بیش از آبیاری سطحی بود. همچنین به ترتیب SDI100 و SDINone بیشترین مقدار ماکزیمم شاخص سطح را در دو فصل داشت. با توجه به کاهش شوری در محدوده توسعه ریشه در تیمار SDI60 انتظار می رفت عملکرد بیشتر افزایش پیدا کند. همچنین انتظار می رفت ریشه نیز تا عمق بیشتری توسعه پیدا کند اما احتمالاً به دلیل تنش اکسیژن ناشی از تخلخل تهویه ای کم، ریشه تا عمق ۶۲ cm توسعه پیدا کرده است؛ اما باین حال عملکرد گیاه از DI60 بیشتر بوده که می تواند به دلیل شوری کمتر گیاه در محدوده توسعه ریشه باشد. در سطح ایستابی کمتر از یک متر احتمال تنش اکسیژن برای گیاه وجود دارد که با کاهش عمق سطح ایستابی تا ۶۰ سانتی متر این پدیده شدت می گیرد. در شرایط خشکی و تنش رطوبت و از طرفی شور نبودن سطح

¹ Compensated RWU approach

کشت تابستانه ذرت بیش از کشت بهاره بوده است؛ اما سایر خصوصیات رشد گیاه ذرت که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند همانند حجم ریشه، عرض ریشه، وزن خشک و تر و ارتفاع گیاه در دو نوبت کاشت از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشتند.

معنی‌داری داشته‌اند. به طوری که نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد که زمان کاشت محصول به‌طور معنی‌داری باعث افزایش عملکرد دانه و در نتیجه بهره‌وری مصرف آب شده است که در تابستان بیشتر از بهار بوده است. همچنین شاخص سطح برگ، طول ریشه و وزن تر گیاه نیز از زمان کاشت تأثیر پذیرفته‌اند و در

جدول ۸- مقایسه میانگین عملکرد، بهره‌وری مصرف آب (WP)، سطح برگ، ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک گیاه؛ طول ریشه، عرض ریشه، حجم ریشه در ذرت بهاره و تابستانه

عملکرد	بهره‌وری مصرف آب	سطح برگ	حجم ریشه	طول ریشه	عرض ریشه	وزن تر	وزن خشک	ارتفاع گیاه	مقایسه میانگین‌ها	
									کیلوگرم بر مترمکعب	کیلوگرم بر هکتار
۴۰۰۰c	۰/۶۱c	۱/۴۲a	۱۴۵/۳a	۸۰/۳a	۷۰/۵a	۱۳۴/۳b	۳۲/۸b	۱۸۲/۳ab	۱۰۰	سطح آب زیرزمینی (سانتی‌متر)
۳۷۰۹b	۰/۵۷b	۱/۲b	۱۲۴/۴b	۷۰/۱b	۶۵a	۱۳۴/۵b	۷۰/۱a	۱۷۷/۱b	۶۰	
۴۱۸۳a	۰/۶۴a	۱/۴۷a	۱۵۰a	۸۵/۳a	۷۲a	۱۴۰/۳a	۳۸/۱a	۱۹۰/۳a	شاهد	
<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۷۷	۰/۰۱۷	۰/۴۶	۰/۰۴۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۳	P value	
۸۲۱۶c	۱/۲۶c	۱/۷۴b	۱/۴b	۷۱/۳b	۶۷/۶ab	۱۳۰/۶b	۳۲/۵b	۱۷۵/۵b	۱۰۰	
۶۹۷۶b	۱/۰۷b	۱/۶c	۱/۵۱a	۶۸/۸b	۶۳/۳b	۱۳۲/۵ab	۳۶/۳a	۱۸۶/۵a	۶۰	
۸۵۸۳a	۱/۳۲a	۱/۸۳a	۱/۵۲a	۷۷/۱a	۷۷a	۱۳۶/۶a	۳۷/۸a	۱۹۱/۳a	شاهد	
<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	P value	
۲۶۵۳b	۰/۴b	۱/۳۳b	۱۳۸/۷b	۷۴b	۸۰b	۱۳۴/۳a	۴۰/۱۶a	۱۷۷/۱b	DI	
۵۲۷۷a	۰/۸a	۱/۴۵a	۱۴۱/۵a	۸۳/۷a	۶۰a	۱۳۵a	۳۲/۲b	۱۸۳/۳a	SDI	
<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۳	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۴	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۹	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۴	P value	
۶۷۵۰b	۱/۰۳b	۱/۶b	۱/۶۱a	۶۲b	۷۹a	۱۳۹a	۴۱a	۱۷۷b	DI	
۹۱۰۰a	۱/۴a	۱/۹a	۱/۳۵b	۸۲a	۵۷b	۱۲۷b	۳۰b	۱۹۱/۷a	SDI	
<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۳	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۹	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۴	P value	
۲۶۸۹c	۰/۴۱d	۱/۳۹b	۱۵۲/۶b	۷۲/۶b	۸۰a	۱۴۰/۶b	۳۷/۶bc	۱۷۵bc	DI	اثر متقابل سطح آب زیرزمینی * روش آبیاری
۵۳۱۱/۶b	۰/۸۲a	۱/۴۵ab	۱۳۸c	۸۱a	۶۱b	۱۲۸c	۲۸d	۱۹۲ab	SDI	
۲۳۳۵d	۰/۳۵e	۱/۱۷c	۱۶۸a	۵۸b	۷۵/۶a	۱۴۸a	۵۰a	۱۷۰c	DI	
۵۰۸۳/۳b	۰/۷۸b	۱/۴ab	۱۳۴c	۸۳a	۵۹b	۱۲۲d	۳۰/۳cd	۱۸۵abc	SDI	
۲۹۳۳/۳c	۰/۴۵c	۱/۴۵ab	۱۴۵b	۸۵/۶a	۸۳a	۱۵۰a	۴۳/۳ab	۱۸۶abc	DI	
۵۴۲۳/۳a	۰/۸۳a	۱/۵a	۱۰۳d	۸۵a	۶۲/۳b	۱۳۱c	۲۳cd	۱۹۶a	SDI	
۰/۰۰۲	<۰/۰۰۰۱	۰/۲	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۲	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۵	P value	
۷۲۸۰b	۱/۱۲c	۱/۵b	۱۵۰b	۶۲/۳b	۷۹a	۱۳۷ab	۳۶/۳bc	۱۸۰/۲b	DI	
۹۱۵۳/۳a	۱/۴a	۱/۹a	۱۳۵c	۸۰/۳a	۵۶/۳b	۱۲۸b	۲۹d	۱۹۳a	SDI	
۵۳۳۸/۶d	۰/۸۲d	۱/۵b	۱۶۷/۳a	۵۶b	۷۴/۶a	۱۳۹a	۴۷a	۱۶۵c	DI	
۸۶۱۳/۳b	۱/۳b	۱/۸a	۱۳۴/۶c	۸۱/۶a	۵۶b	۱۲۲/۳c	۲۸/۶d	۱۸۶ab	SDI	
۷۶۳۳/۳b	۱/۱۷c	۱۵۴/۵b	۱۶۷/۶a	۶۷/۶b	۸۴/۳a	۱۴۱/۳a	۴۰b	۱۸۶ab	DI	
۹۵۲۳/۳a	۱/۴۶a	۲a	۱۳۷/۶c	۸۶/۶a	۶۰b	۱۳۲ab	۳۲/۶cd	۱۹۶/۶a	SDI	
<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۴۰	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۳	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۵۵	P value	

در هر ستون تیماری، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت آماری معنی‌داری ندارد. شاهد: بدون محدودیت سطح ایستابی، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی متر نشان‌دهنده سطح ایستابی در این عمق‌ها است.

جدول ۹- مقایسه میانگین عملکرد، بهره‌وری مصرف آب (WP)، سطح برگ، ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک گیاه؛ طول ریشه، عرض ریشه، حجم ریشه ذرت بهاره و تابستانه در آزمون T-Test

نوع کشت ذرت	ارتفاع گیاه سانتی‌متر	وزن خشک گرم	وزن تر گرم	عرض ریشه سانتی‌متر	طول ریشه سانتی‌متر	حجم ریشه سانتی‌متر مکعب	سطح برگ سانتی‌متر مربع	بهره‌وری مصرف آب کیلوگرم بر مترمکعب	عملکرد کیلوگرم بر هکتار
بهاره	۱۸۰a	۳۶/۵a	۱۳۴/۴a	۶۸a	۷۵a	۱۴۸a	۱/۳۵a	۱/۵۹a	۳۸۵۴/۷۵a
تابستانه	۱۸۱a	۳۵/۱a	۱۳۱/۵b	۶۶a	۷۰b	۱۴۶a	۱/۷b	۱/۱۶b	۷۵۹۶/۳۳b
P.value	۰/۸	۰/۱۱	۰/۰۳۷	۰/۰۶۵	۰/۰۳۳	۰/۴۲	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۰۱<

در هر ستون تیماری، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون T-Test در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت آماری معنی‌داری ندارد.

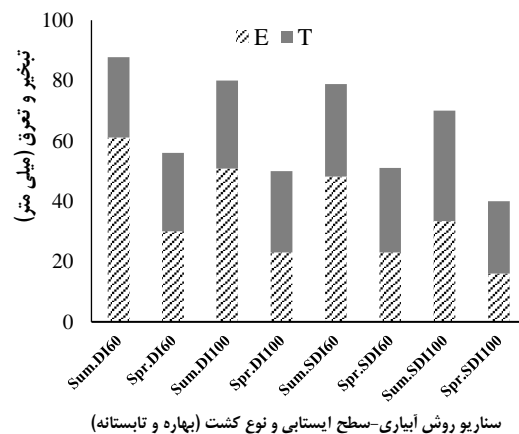
نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در حضور سطوح ایستابی ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر بر توزیع دوبعدی رطوبت و شوری خاک و همچنین ویژگی‌های مورفولوژیکی و عملکرد گیاه ذرت مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این پژوهش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی روشی پرفایده برای کشت گیاه (به‌ویژه گیاهان حساس به شوری) در شرایط سطح ایستابی کم‌عمق و شور است. به‌طوری‌که با افزایش آبشویی در منطقه ریشه و کاهش شوری در منطقه کاپیلاری و سطح ایستابی شور سبب توسعه عمقی ریشه گیاه می‌شود.

نتایج مطالعه توزیع شوری نشان داد که آبشویی نمک عمدتاً در زیر قطره‌چکان‌ها و در محدوده‌ی پیاز رطوبتی اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج نشان داد که شوری خاک در اطراف پیاز رطوبتی متأثر از عمق سطح ایستابی و شوری آن، شوری آب آبیاری و مقدار آب آبیاری است. در سطح ایستابی ۱۰۰ سانتی‌متر شوری خاک سطحی به نسبت کمتر و یکنواخت‌تر در طول نیمرخ خاک به‌ویژه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی داشت. نتایج نشان داد شوری زیاد در سطح خاک متأثر از شوری سطح ایستابی کم‌عمق و آب آبیاری بود. به‌طوری‌که توزیع رطوبت و متعاقباً توسعه ریشه بشدت تحت تأثیر شوری منتقل‌شده از سطح ایستابی شور کم‌عمق به لایه‌های بالاتر نیمرخ خاک است. قرار گرفتن قطره‌چکان در عمق مناسب نه‌تنها سبب کاهش شوری در محدوده عمق ریشه می‌شود، بلکه سبب کاهش تبخیر از سطح خاک و افزایش عملکرد گیاه و بهره‌وری مصرف آب شد. نتیجه

تبخیر و تعرق

نتایج نشان داد در مقایسه دو روش آبیاری بر مقدار تبخیر و تعرق، روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در کاهش تبخیر و تعرق کارآمدتر از آبیاری قطره‌ای سطحی بوده است؛ به‌طوری‌که مقدار تبخیر و تعرق برای سطح ایستابی با عمق ۶۰ سانتی‌متر، ۲۶ تا ۳۰ درصد و برای سطح ایستابی ۱۰۰ سانتی‌متر ۴۳ تا ۵۱ درصد کمتر از آبیاری سطحی بوده است (شکل ۴). در ارتباط با نسبت تبخیر به تعرق، آبیاری زیرسطحی نسبت به آبیاری سطحی بخش کمتری از تبخیر (بخصوص در مراحل ابتدایی رشد) داشته است. این نتایج با نتایج گزارش‌شده توسط آلن و همکاران (Allen et al., 1998)، تروت و و دی جونگ (Trout and DeJonge, 2018) و والنتین و همکاران (Valentin et al., 2019) مطابقت دارد.



شکل ۴- مقایسه تبخیر (E) و تعرق (T) در ۴ سناریوی SDI60، DI100، SDI100 و دو فصل زراعی بهار و تابستان

- transport in the soil profile under surface and subsurface drip irrigation methods in the presence of shallow saline groundwater. *Arab J Geosci.* 15: 1666- 2022
- Alkhaier, F., Flerchinger, G.N. and Su, Z. 2012. Shallow groundwater effect on land surface temperature and surface energy balance under bare soil conditions: modeling and description. *Hydrology and Earth System Sciences.* 16: 1817-1831.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), p.D05109.
- Braud, I., Varado, N. and Olioso, A. 2005. Comparison of root water uptake modules using either the surface energy balance or potential transpiration. *J. Hydrol.* 301:267–286.
- Chen, N., Li, X., Simunek, J., Shi, H., Hu, Q. and Zhang, Y. 2020. Evaluating soil nitrate dynamics in an intercropping dripped ecosystem using HYDRUS-2D. *Science of the Total Environment* 718: 137314.
- Dagdelen, N., Basal, H., Yılmaz, E., Gürbüz, T. and Akcay, S. 2009. Different drip irrigation regimes affect cotton yield water use efficiency and fiber quality in western Turkey. *Agricultural Water Management.* 96: 111–120.
- El Maayar, M., Price, D.T. and Chen, J.M. 2009. Simulating daily, monthly and annual water balances in a land surface model using alternative root water uptake schemes. *Adv. Water Resour.* 32:1444–1459.
- FAO, 2020. Mapping of salt-affected soils – Technical specifications and country guidelines. FAO.
- Farre, I., van Oijen, M., Leffelaar, P. A. and Faci, J. M. 2000. Analysis of maize growth for different irrigation strategies in northeastern Spain. *European Journal of Agronomy*, 12: 225–238.
- Grieve, C. M., Grattan, S. R. and Maas, E. V. 2012. Plant salt tolerance. In W. W. Wallender, & K. K. Tanji Eds.(ASCE manual and reports on engineering practice No. 71: Agricultural salinity assessment and management 2nd ed. pp: 405–459). ASCE.
- Hanson, B. and May, D. 2004. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agricultural Water Management.* 68(1); 1–17.
- Hanson, B., Hopmans, J. W. and Šimůnek, J. 2008. Leaching with subsurface drip irrigation under saline, shallow groundwater conditions. *Vadose Zone Journal.* 7(2): 810-818.
- این مطالعه نشان می‌دهد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط سطح ایستابی شور و کم‌عمق می‌تواند در افزایش عملکرد محصول، بهره‌وری مصرف آب و به تبع کاهش انتقال نمک به سطح خاک مؤثر واقع شود. توسعه ریشه گیاه ذرت به طور معنی‌داری از رطوبت قابل جذب خاک تأثیر می‌پذیرد. به طوری که در آبیاری زیرسطحی به دلیل کمبود رطوبت در سطح خاک بیشتر توسعه ریشه در عمق خاک بوده است. همچنین به دلیل تأثیر افزایش رطوبت خاک بر کاهش شوری خاک، با افزایش عمق قطره‌چکان در آبیاری زیرسطحی، شوری خاک در عمق کمتر بوده که بر توسعه ریشه گیاه تا لایه‌های عمیق‌تر تأثیر مستقیم داشته است. نتایج نشان داد رطوبت و شوری خاک بر توسعه عرضی و حجم ریشه نیز تأثیر داشته‌اند. به طوری که در آبیاری سطحی ریشه گیاه ذرت حجم بیشتری نسبت به آبیاری زیرسطحی داشته است. همچنین نتایج نشان داد در حالی که حجم و عرض ریشه در آبیاری سطحی بیش از زیرسطحی بود، اما گیاه ذرت ریشه‌های باریک‌تری تولید کرده بودند که در واقع استراتژی ریشه گیاه برای مقابله با تنش شوری است.

منابع

- برزگری، م، آفرینش، ع، اسلامی زاده، ر، قنبری بیرگانی، د، زاده دباغ، غ، میرزاشاهی، ک، سلیم پور، س. و خرمیان، م . ۱۳۸۶. نشریه ترویجی کاشت، داشت و برداشت ذرت در استان خوزستان. وزارت جهاد کشاورزی، سازمان جهاد کشاورزی خوزستان ترویج و نظام بهره‌برداری.
- Abbas, G., Amjad, M., Saqib, M., Murtaza, B., Naeem, M. A., Shabbir, A. and Murtaza, G. 2020. Soil sodicity is more detrimental than salinity for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): A multivariate comparison of physiological, biochemical and nutritional quality attributes. *Journal of Agronomy and Crop Science.* 207: 59–73.
- Abdoli, S., Khalilimoghadam, B., Rahnema, M. and Soleimani, M. 2017 Comparison of different mass transport equations for wind erosion quantification purposes in southwest Iran: a wind tunnel study. *Desert.* 22:197-208
- Abdoli, S., Farrokhan Firouzi, A., Abbasi, F. and Naseri, A. 2022. Heat moisture and salt

- Hussain, T., Koyro, H. W., Zhang, W., Liu, X., Gul, B., Liu, X. 2020. Low salinity improves photosynthetic performance in *Panicum antidotale* under drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 11, 481.
- Hütsch, B. W., Jung, S., Schubert, S. 2015. Comparison of salt and drought-stress effects on maize growth and yield formation with regard to acid invertase activity in the kernels. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201, 353–367.
- Ibrahim, M. M., El-Baroudy, A. A., Taha, A. M., 2016. Irrigation and fertigation scheduling under drip irrigation for maize crop in sandy soil. *International Agrophysics*, 30(1), 47–55.
- Karimi, G. H., Naseri, A. A., Behzad, M., Meskarbashi, M. 2011. Groundwater contribution with different salinities on providing maize water requirement and its effects on maize yields. *Research on Crops*, 12(3): 848-856.
- Kollet, S., Maxwell, R. 2008. Capturing the influence of groundwater dynamics on land surface processes using an integrated, distributed watershed model. *Water Resources Research* 44.
- Li Liu, D., Zeleke, K.T., Wang, B., Macadam, M. and Scott, F. 2017. Crop residue incorporation can mitigate negative climate change impacts on crop yield and improve water use efficiency in a semiarid environment. *European Journal of Agronomy*. 85 (2017) 51–68.
- Mengistu, A. G., van Rensburg, L. D., and Mavimbela, S. S. 2018. Shallow groundwater effects on evaporation and soil temperature in two windblown sands (Eutric Cambisol and Chromic Luvisol) in South Africa. *Geoderma Regional* 15: e00190.
- Minhas, P. S., Bamos, T. B., Ben-Gal, A., Pereira, L. S. 2020. Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agricultural Water Management*, 227, 105832.
- Moll, R.H., Kamparth., E.J. 1977. Effect of population density up on agronomic traits associated with genetic increases in yield of *Zea mays* L. *Agronomy journal*, 69: 81-84.
- Monaghan, J. M., Daccache, A., Vickers, L. H., Hess, T. M., Weatherhead, E. K., Grove, I. G., Knox J. W. 2013. 'More crop per drop': Constraints and opportunities for precision irrigation in European agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(5), 977–980.
- Oikeh, S. O., Kling, J. G., Okoruwa, A. E. 1988. Nitrogen fertilizer management effects on maize grain quality in the best African Moist Savanna. *J. Crop Sci.* 38:1056-1061.
- Oron, G., DeMalach, Y., Gillerman, L., David, I., Rao, V. 1999. Improved saline-water use under subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management* 39: 19-33.
- Oren, R., Philips, N., Ewers, B.E., Pataki, D.E. and Megonigal, J.P. 1999. Sap-flux scaled transpiration responses to light, vapour pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest. *Tree Physiol.* 19: 337–347.
- Plaut, Z., Edelstein, M. and Ben-Hur, M. 2013. Overcoming salinity barriers to crop production using traditional methods. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 32(4): 250-291.
- Rose, D. A., Konukcu, F. and Gowing, J. W. 2005. Effect of water table depth on evaporation and salt accumulation above saline groundwater. *Aust. Australian Journal of Soil Research*. 43: 565–573.
- Sampathkumar, T., Pandian, B. J. and Mahimairaja, S. 2012. Soil moisture distribution and root characters as influenced by deficit irrigation through drip system in cotton–maize cropping sequence. *Agricultural water management*. 103: 43-53.
- Selim, T., Berndtsson, R. and Persson, M. 2013. Simulation of soil water and salinity distribution under surface drip irrigation. *Irrigation and Drainage*. 62: 352-362.
- Setia, R. and Marschner, P. 2013. Impact of total water potential and varying contribution of matric and osmotic potential on carbon mineralization in saline soils. *European Journal of Soil Biology*. 56: 95–100.
- Shahzad, M., Witzel K. Zörb, C. and Mühling, K. H. 2012. Growth-related changes in subcellular ion patterns in maize leaves (*Zea mays* L.) under salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 198: 46–56
- Sheldon, A. R., Dalal, R. C., Kirchhof, G., Kopittke, P. M. and Menzies, N. W. 2017. The effect of salinity on plant-available water. *Plant and Soil*, 418(1–2): 477–491.
- Skaggs, T., Trout, T., Šimunek, J. and Shouse, P. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130: 304-310.
- Soylu, M. E., Loheide, S. P., Kucharik, C. J. 2017. Effects of root distribution and root water compensation on simulated water use in maize influenced by shallow groundwater. *Vadose Zone Journal*. 16(10): 1-15.

- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. and Rea, S. D. 2012. Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. Rome Italy.
- FAO (2020). Mapping of salt-affected soils – Technical specifications and country guidelines. FAO.
- Stone, P. J., Wilson, D. R., Reid, J. B. and Gillespie, G. N. 2001. Water deficit effects on sweet maize: I. Water use radiation use efficiency growth and yield. *Australian Journal of Agricultural Research*. 52: 103–113.
- Teuling, A.J., Uijlenhoet, R., Hupet, F. and Troch P.A. 2006. Impact of plant water uptake strategy on soil moisture and evapotranspiration dynamics during drydown. *Geophys. Res. Lett.* 33:L03401.
- Trout, T.J. and DeJonge, K.C. 2018. Crop water use and crop coefficients of maize in the great plains. *J Irrig Drain Eng.* 144(6):04018009
- Valentín, F., Nortes, P. A., Domínguez, A., Sánchez, J. M., Intrigliolo, D. S., Alarcón, J. J. and López-Urrea R. 2020. Comparing evapotranspiration and yield performance of maize under sprinkler superficial and subsurface drip irrigation in a semi-arid environment. *Irrigation Science*. 38(1): 105-115.
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44: 892-898.
- Whalley, W. R., Ober, E. S. and Jenkins, M. 2013. Measurement of the matric potential of soil water in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*. 64(13): 3951–3963.
- Yadav, B.K. Mathur, S. and Siebel, M.A. 2009. Soil moisture dynamics modeling considering the root compensation mechanism for water uptake by plants. *J. Hydrol. Eng.* 14:913–922.
- Yu, R., Liu, T., Xu, Y., Zhu, C., Zhang, Q., Qu, Z., Liu, X. and Li, C. 2010. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China. *Agricultural Water Management*. 97: 1952–1960.
- Zhang, T., Ji, X., Zhan, X., Ding, Y., Zou, Y., Kisekka, I. and Feng, H. 2021. Maize is stressed by salt rather than water under drip irrigation with soil matric potential higher than– 50 kPa in an arid saline area. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 207(4): 654-668.
- Zhang, T., Zou, Y., Kisekka, I., Biswas, A. and Cai H. 2020. Comparison of different irrigation methods to synergistically improve maize's yield water productivity and economic benefits in an arid irrigation area. *Agricultural Water Management*. 243: 106497.
- Zhang, X., Zörb, C., Kränzlein, M., Franzisky, B., Kaiser, H. and Geilfus, C., M. 2019. The early stress response of maize (*Zea mays* L.) to chloride salinity. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 205: 586–597.

The Effect of Surface and Subsurface Drip Irrigation in the Presence of Shallow Saline Water Table on the Two-Dimensional Distribution of Soil Moisture and Salinity, Morphological Characteristics and Maize Yield

S. Abdoli¹, A. Farrokhian Firouzi^{*2}, F. Abbasi³ and A. Naseri⁴

Abstract

In the south of Iran, due to being located in the arid and semi-arid regions, the agricultural sector faces soil salinity resulting from the capillary rise of salt from the shallow saline water table to the soil surface and reducing crop yield. The objective of this research was to investigate the effect of surface drip irrigation (DI) and subsurface irrigation (SDI) methods on soil profile moisture and salinity distribution, maize (SC 703) yield, and irrigation water use efficiency in the presence of shallow saline water table (60 and 100 cm), during summer and spring seasons of 2021. A factorial experiment was conducted based on randomized complete block design with three replications in drained lysimeters filled with loamy soil (specific gravity 1.45 g cm^{-3}) in field conditions. The results showed that the accumulation of salt above the dripper in subsurface irrigation method at both SDI₁₀₀ and SDI₆₀ treatments, was significantly more than the surface irrigation method ($p < 0.01$). The results also revealed that summer maize yield was more than spring maize yield. Furthermore, in the summer season, irrigation in the root development zone in the SDI₁₀₀ and SDI₆₀ treatments caused an increase in the maize yield by 25 and 61%, respectively, and Water Productivity Index (WP) by 25 and 58%, respectively, in comparison to DI₁₀₀ and DI₆₀. Evaporation in SDI₆₀ and SDI₁₀₀ treatments was 26-30% and 43-51% lower than DI₆₀ and DI₁₀₀ treatments, respectively. The results of this research showed that SDI is more effective than DI in controlling soil profile salinity and plant yield.

Keyword: Arid and semi-arid regions, Maize (SC 703), Salinity stress, Subsurface and surface drip irrigation

¹ Phd, Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

² Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (*Corresponding Author Email: a.farrokhian@scu.ac.ir)

³ Professor Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

⁴ Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 7 Dec 2022

Accepted: 10 Jan 2023