

پاسخ گیاه پسته به توزیع رطوبت و شوری در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

علی عطایی^{۱*}، مهدی اکبری^۲، محمدرضا نیشابوری^۳، داود زارع حقی^۴، اژدر عنابی میلانی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲

چکیده

در این تحقیق، توزیع شوری و رطوبت حاصل از کاربرد آب شور در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و زیرسطحی (SDI) برای درختان پسته مورد بررسی قرار گرفت. از پاسخ گیاهی جهت تعیین پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی HYDRUS استفاده شد. دو پارامتر EC_{50} و h_{m50} معادل کاهش ۵۰ درصد جذب آب ریشه به دلیل خشکی و شوری به ترتیب ۸۹۲۵ cm و ۲۹/۷ dS/m به دست آمد. مدل هایدروس توانست با دقت بالایی توزیع رطوبت و شوری را در ناحیه ریشه درختان پسته شبیه‌سازی نماید. نتایج نشان داد که کم‌ترین میزان تجمع املاح در نزدیکی قطره‌چکان‌ها بود و با دور شدن از آن، شوری خاک افزایش یافت. همچنین تعرق روزانه و جذب آب ریشه محاسبه شده توسط مدل با هدایت روزانه‌ای و جریان شیره آوندی همبستگی معنی‌داری را نشان داد. بر اساس نتایج هایدروس و اندازه‌گیری گیاهی، مشخص شد که جذب آب ریشه در SDI به طور معنی‌داری از DI بیش‌تر است که نشان داد SDI با کاهش تبخیر سطحی و توزیع مناسب رطوبت و شوری، باعث کاهش تنش رطوبتی گردید. همچنین مشاهدات نشان داد که به علت کاهش رطوبت خاک، از روز پنجم آبیاری به بعد، جذب آب ریشه را با محدودیت مواجه کرد. بنابراین کوتاه‌تر کردن دور آبیاری برای جلوگیری از تنش رطوبتی ضروری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تابع تنش رطوبتی، تعرق، جذب آب ریشه، هایدروس

مقدمه^۱

برای درختان پسته در کالیفرنیا انجام داد. در این تحقیقات، تاثیر روش‌های آبیاری یاد شده بر میزان تولید، صرفه‌جویی در مصرف آب، میزان انرژی مصرفی، سرعت رشد درختان (قطر تنه)، میزان رشد علف‌های هرز، مقدار کودهای مورد نیاز و تحلیل هزینه‌ها بررسی شدند. در همه موارد، برتری روش‌های قطره‌ای، به‌خصوص روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری سطحی، به اثبات رسیده است (Burt., 1996). کاهش تبخیر، نفوذ عمقی و حذف رواناب، کاهش مصرف آب که منجر به تجمع کم‌تر نمک در مزرعه می‌شود، مرطوب بودن مداوم خاک به دلیل دور کوتاه‌تر آبیاری قطره‌ای و جلوگیری از افزایش غلظت نمک و پتانسیل اسمزی و خروج املاح به خارج از محیط خیس شده، از جمله محاسن آبیاری قطره‌ای در ارتباط با استفاده از آب‌های شور می‌باشد. با این حال، به دلیل حجم کم آبیاری در روش قطره‌ای، نمک‌های خاک فقط به اطراف جبهه خیس‌شدگی آبشویی شده و در نتیجه تجمع نمک در سطح خاک مشاهده می‌گردد (سیفی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Roberts et al., 2009).

افزایش اطلاعات در زمینه جریان آب خاک و انتقال املاح و توزیع مکانی آن‌ها نقش مهمی در طراحی و کارکرد سامانه‌های آبیاری بازی می‌کند (Chen et al., 2014). ازدیاد املاح در حوزه فعالیت ریشه بستگی به مقدار نمک آب آبیاری، تعداد دفعات آبیاری، صعود مویینه آب زیرزمینی و منشأ خاک دارد (طباطبایی و همکاران،

با رشد فزاینده تقاضای آب برای انواع مصارف و محدودیت نسبی منابع آب به ویژه در کشورهای با اقلیم خشک و نیم خشک و از طرف دیگر کاهش کیفیت منابع آب قابل دسترس، بهبود مدیریت آبیاری و تخصیص بهینه منابع آب موجود ضروری می‌باشد. کاهش مصرف آب در آبیاری باغ‌ها را می‌توان با افزایش بازده کاربرد آب و کاهش تلفات به دست آورد. در ۲۰ سال گذشته، روند رو به رشدی به سمت استفاده از سامانه‌های آبیاری میکرو وجود داشته است و اکنون به‌طور گسترده‌ای در باغ‌های میوه، اجرا می‌شود (Iniesta et al., 2008). برت تحقیقات چندساله‌ای را در خصوص مقایسه آبیاری سطحی (جوی-پشته‌ای) با دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
 - ۲- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج- ایران
 - ۳- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
 - ۴- استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
 - ۵- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران
- *- نویسنده مسئول: (Email: aliataee.kh@gmail.com)

عصاره آوندی (Tognetti et al., 2004) و همچنین کاهش جذب آب (Nang., 2012) شده است.

پسته، به عنوان یکی از محصولات استراتژیک ایران با ارزش اقتصادی بالا، در مناطق خشک با محدودیت کمی و کیفی منابع آب کشت می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی درختان پسته گسترش یافته است؛ اما با توجه به کیفیت نامطلوب آب در اکثر مناطق تحت کشت پسته، تجمع نمک در پروفیل خاک، به ویژه لایه سطحی خاک، از مشکلات اساسی کشاورزان می‌باشد. اگرچه تا به حال مطالعات مختلفی در زمینه آبیاری قطره‌ای انجام شده است (سیفی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Lekakis and Antonopoulos., 2015)، اما افزایش اطلاعات در رابطه با اثرات تغییر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی به زیرسطحی بر الگوی توزیع رطوبت و شوری ناحیه ریشه در شرایط مزرعه و تحت مدیریت باغ‌دار و چگونگی پاسخ گیاهی و جذب آب توسط گیاه در این شرایط ضروری می‌باشد. این پژوهش با هدف مطالعه و مدل‌سازی توزیع رطوبت و شوری خاک در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با آب شور با استفاده از نرم‌افزار هایدروس و اثر آن بر جذب آب ریشه و پاسخ گیاهی انجام گردید. همچنین قابلیت پاسخ گیاهی جهت استخراج پارامترهای مورد نیاز جهت مدل‌سازی و ارزیابی خروجی مدل، مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سال ۱۳۹۶ در یک باغ پسته ۱۰ هکتاری واقع در دهستان اخترآباد از توابع شهرستان شهریار استان تهران به طول جغرافیایی $35^{\circ} 34' 10''$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 46' 35''$ شمالی و ارتفاع ۸۸۰ متر از سطح دریا به اجرا درآمد. درختان پسته ۱۲ ساله بوده و رقم درختان مورد مطالعه احمد آقایی بود. فاصله بین ردیف درختان ۵ متر و متوسط فاصله درختان روی ردیف ۱/۲ متر بود. میانگین، کم‌ترین و بیش‌ترین متوسط دما در طول سال زراعی مذکور بر اساس آمار نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی کشور به ترتیب ۱۸/۲، ۵/۹۹- و ۴۱/۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه ۱۷۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شد (آمار سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۶).

سامانه‌های آبیاری مورد مطالعه

سامانه اصلی آبیاری مورد استفاده در باغ فوق‌الذکر، آبیاری قطره‌ای سطحی، به صورت دو ردیفه در دو طرف ردیف درختان با فواصل ۵۰ سانتی‌متر از تنه درختان می‌باشد. قطره‌چکان‌ها با دبی ۸L/h با فاصله ۷۵ سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند. منبع آب آبیاری یک رشته قنات بود که آب آن به یک استخر ذخیره آب هدایت شده

(۱۳۹۵). تاثیر استفاده از آب شور بر خصوصیات شیمیایی خاک در مطالعات متعدد، بررسی شده و نشان داده که به مرور باعث شوری بیش‌تر خاک شده است (Selim et al., 2013; Roberts et al., 2009). اگرچه اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای رطوبت و شوری خاک تحت آبیاری قطره‌ای قابل اعتماد هستند، اما زمان و هزینه مهم‌ترین موانع انجام این اندازه‌گیری‌ها، به‌خصوص در مقیاس‌های بزرگ، طرح‌های مختلف آبیاری و شرایط اقلیمی متفاوت می‌باشد. به منظور حل مشکلات اشاره شده می‌توان از شبیه‌سازی‌های عددی استفاده نمود. مدل هایدروس یک ابزار موفق و دقیق برای شبیه‌سازی جریان آب و حرکت املاح در روش‌های مختلف آبیاری و از جمله آبیاری قطره‌ای می‌باشد (Skaggs et al., 2004; Šimůnek et al., 2008; AbouLila et al., 2012; Phogat et al., 2012). نرم‌افزار HYDRUS-2D فرم اصلاح شده معادله ریچاردز را برای شرایط اشباع - غیراشباع جریان آب با در نظر گرفتن جذب آب توسط ریشه گیاهان حل می‌کند. همچنین برای انتقال املاح و دما در محیط متخلخل، معادله پخشیدگی - انتشار حل شد (Selim et al., 2013). حسن و همکاران نشان دادند که هایدروس دوبعدی^۱ می‌تواند میانگین EC در یک دوره رشد کامل که شامل آبیاری جوپچه‌ای، انتقال املاح و جذب آب ریشه بود را برآورد کند (Hassan et al., 2005). رابرتز و همکاران تلاش کردند تا توزیع املاح حاصل از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آب شور را با به کارگیری برخی پارامترهای اندازه‌گیری شده در دو فصل زراعی در دو گیاه مختلف با استفاده از هایدروس دوبعدی برآورد نمایند. مدل، در پایان اولین فصل رشد نتوانسته بود تجمع املاح را با دقت مناسبی برآورد کند؛ اما در پایان فصل رشد دوم، قابلیت مدل برای جریان آب و تجمع املاح رضایت‌بخش بود. البته مقادیر EC پیش‌بینی شده دارای کم برآورد ثابتی بودند (Roberts et al., 2009).

توزیع شوری در ناحیه ریشه نقش کلیدی در میزان آب جذب شده توسط ریشه گیاهان و همچنین میزان تعرق ایفا می‌کند. حرکت آب به سمت ریشه‌های گیاه، پاسخی به شیب پتانسیل اسمزی ایجاد شده توسط خود گیاه می‌باشد. وقتی که شوری خاک زیاد باشد، املاح موجود در ناحیه ریشه باعث افزایش پتانسیل اسمزی خاک و کاهش شیب پتانسیل آب بین محلول خاک و سلول‌های ریشه گیاهی می‌شود. بنابراین در خاک شور، اگرچه تفاوتی در انرژی نگهدارنده آب در ماتریکس خاک وجود ندارد، اما حضور انرژی حاصل از املاح محلول در خاک (پتانسیل اسمزی)، گیاه را ملزم به مصرف نیروی بیش‌تری جهت جذب آب می‌نماید. طبق تحقیقات انجام شده، تنش شوری باعث کاهش پتانسیل آب برگ (Lemur et al., 2001)، کاهش هدایت روزنه‌ای (Volpe et al., 2011)، کاهش جریان

در ابتدای آزمایش پروفیلی حفر و تا عمق ۸۰ سانتی‌متری به فواصل ۲۰ سانتی‌متری نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده (در سیلندرهایی به حجم تقریباً 100 cm^3) تهیه گردید. بافت خاک به روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل در نمونه‌های دست‌نخورده، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت و مشخصات نگهداری آب خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشار اندازه‌گیری شد و مدل منحنی رطوبتی و نگوختن به آن برآزش داده شد (Van Genuchten., 1980) (جدول ۱). همچنین، در ضمن نمونه‌برداری مشخص شد که یک لایه با مقاومت بسیار بالا با درصد بالای قله‌سنگ و سنگ‌ریزه در عمق ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متری خاک وجود دارد که باعث عدم نفوذ ریشه به لایه‌های پایین‌تر شده و توزیع ریشه را با محدودیت مواجه کرده است.

بود. در این مزرعه با توجه به مدیریت باغ‌دار، آبیاری‌ها هر هشت روز یک‌بار و به مدت ۶ ساعت صورت گرفت. شوری آب آبیاری در طول فصل زراعی تقریباً روند ثابتی داشت و برابر $6/57 \text{ dS/m}$ بود. به منظور مطالعه چگونگی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در ابتدای فصل رشد (اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۶) در سه ردیف از درختان به عنوان سه تکرار، خروجی آب قطره چکان‌ها به عمق ۳۵ سانتی‌متری انتقال داده شد. به منظور استخراج اثرات تنش شوری و خشکی بر پاسخ گیاهی در نصف ردیف از درختان نیز آبیاری قطره‌ای سطحی با استفاده از آب نسبتاً شیرین ($EC=1.5 \text{ dS/m}$) و در دوره‌های سه روزه صورت گرفت.

نمونه‌برداری و آزمایش‌ها

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مقادیر پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک

n	α ($1/\text{cm}$)	θ_s (m/m)	θ_r (m/m)	Ks (cm/day)	کربن آلی %	B_d (g/cm^3)	بافت	عمق
۱/۴۲۴	۰/۰۲۷۵	۰/۴۷۲	۰/۰۶۵	۱۵۴	۲/۱	۱/۴۶	لوم‌شنی	۲۰-۰
۱/۴۲۷	۰/۰۱۵۴	۰/۴۴۲	۰/۰۹	۱۰۳/۷	۰/۹۴	۱/۵۶	لوم‌شنی	۴۰-۲۰
۱/۳۹۱	۰/۰۲۲۴	۰/۴۱۶	۰/۰۷۶	۵۷/۷	۰/۵۸	۱/۶۵	لوم‌شنی	۶۰-۴۰
۱/۴۴۷	۰/۰۴۰۴	۰/۳۴	۰/۰۷۳	۴۸	۰/۴۸	۱/۶۶	شن‌لومی	۸۰-۶۰

Bd: جرم مخصوص ظاهری خاک، Ks هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_r ، θ_s ، α و n پارامترهای معادله ونگوختن

به فواصل عمقی ۱۰ سانتی‌متر در این لوله‌ها اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که در ابتدای آزمایش به منظور واسنجی دستگاه، نمونه‌هایی تهیه شده و رطوبت آن‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری پاسخ گیاهی

برای ارزیابی پاسخ گیاهی به شرایط رطوبتی خاک از هر سامانه آبیاری سه درخت انتخاب و هدایت روزنه‌ای و جریان شیره آوندی در آن‌ها اندازه‌گیری شد. همان‌گونه که اشاره شد، برای نرمال‌سازی شرایط محیطی، پاسخ‌های گیاهی در درختان مرجع که تحت آبیاری مداوم با آب شیرین بودند اندازه‌گیری گردید.

هدایت روزنه‌ای در وسط روز (ساعت ۱۲-۱۴) و از سطح پایینی برگ‌هایی که در معرض آفتاب قرار داشتند، توسط دستگاه پرومتر مدل AP-4 اندازه‌گیری شد.

شدت جریان شیره آوندی در دو درخت از هر تیمار با استفاده از روش اتلاف گرمایی گرانیو و توسط دستگاه TDP^۲ ساخت شرکت داینامکس (Dynamax) آمریکا اندازه‌گیری گردید (Lu et al., 2004). نصب و راه‌اندازی دستگاه طبق دستورعمل شرکت سازنده

اندازه‌گیری توزیع شوری و رطوبت خاک

در ابتدای فصل آزمایش، جهت تعیین شرایط اولیه شوری خاک، نمونه‌هایی به صورت تصادفی از مجاورت درختان مختلف با استفاده از اگر از فواصل عمقی ۲۰ سانتی‌متری تا عمق ۸۰ سانتی‌متری تهیه گردید. در نیمه‌های فصل رشد (۱۸ مردادماه) جهت بررسی اثرات سامانه‌های آبیاری بر توزیع شوری خاک، از هر سامانه سه درخت انتخاب و در فواصل مختلف از درخت تا عمق ۸۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری با اگر انجام شد (به دلیل وجود لایه سخت و مقاومت بالای خاک، نمونه‌برداری تا عمق بیش‌تر ممکن نبود). هدایت الکتریکی نمونه‌ها در عصاره ۱ به $2/5$ ($EC_{2.5}$) اندازه‌گیری گردید. برای تبدیل $EC_{2.5}$ به هدایت الکتریکی عصاره اشباع EC_e ، در ده نمونه (به طوری که تمام دامنه شوری را در برداشته باشد) EC_e اندازه‌گیری شد و بین آن‌ها رابطه رگرسیونی برقرار گردید.

به منظور بررسی توزیع رطوبت خاک در اطراف درخت، در دو جهت لوله‌هایی از جنس PVC به قطر ۳۲ میلی‌متر با فواصل مختلف از درخت تا عمق ۶۰ سانتی‌متر در خاک نسب گردید و در دوره آزمایش رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج پروفیل پروب^۱

$$a(h, h_o) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_m}{h_{m50}}\right)^p} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{h_o}{h_{o50}}\right)^p} \quad (3)$$

h_{m50} : پتانسیل ماتریک آب خاک در حالتی که جذب آب توسط ریشه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد [cm]; h_{o50} : پتانسیل اسمزی آب خاک که منجر به کاهش ۵۰ درصد جذب آب توسط ریشه گیاه می‌شود، و P : پارامتر برازشی که عموماً ۳ در نظر گرفته می‌شود (ونگنختن و گوپتا، ۱۹۹۳). هایدروس دارای این قابلیت می‌باشد که به جای پتانسیل اسمزی، مستقیماً شوری خاک با واحد dS/m وارد مدل شود. برای به دست آوردن پارامترهای h_{m50} و h_{o50} معادله ۳ به داده‌های پاسخ گیاهی به صورت تابعی از پتانسیل ماتریک و شوری خاک برازش داده شد.

معادله دیفرانسیلی کنترل کننده حرکت توده‌ای - پخشیدگی برای شبیه‌سازی انتقال یک نمک غیرواکنش‌پذیر در محیط همسان و یکنواخت به صورت رابطه ۴ توصیف می‌گردد.

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] - q_i \frac{\partial C}{\partial x_i} \quad (4)$$

C بیانگر غلظت املاح (EC) (عصاره اشباع خاک) و i و j هر دو نشان دهنده بعد فضایی (به ترتیب جهت افقی و عمودی) هستند. قسمت اول سمت راست معادله ۴ نشان‌دهنده جریان املاح به دلیل پخشیدگی و قسمت دوم نشان‌دهنده جریان املاح به دلیل همرفت با جریان آب می‌باشد (Phogat et al., 2012). q_i شدت جریان آب که از رابطه ۱ محاسبه شد و D_{ij} ضریب پخشیدگی املاح ($L^2 T^{-1}$) است که از معادله ۵ به دست می‌آید.

$$\theta D_{ij} = D_T |q_i| \delta_{ij} + (D_L - D_T) \frac{q_i q_j}{|q_i|} + \theta D_w \tau_w \delta_{ij} \quad (5)$$

که q_i نشانگر شدت جریان در جهت i نشانگر شدت جریان در جهت j ، δ_{ij} ضریب پخشیدگی مولکولی در آب آزاد ($L^2 T^{-1}$)، τ_w ضریب اعوجاج خاک (بی‌بعد)، δ_{ij} تابع دلتای کرونکر، D_L ضریب انتشارپذیری طولی (L) و D_T ضریب انتشارپذیری عرضی (L) است (Phogat et al., 2012; Abdou and Flury., 2004; Šimůnek et al., 2012). D_L برابر یک‌دهم عمق پروفیل خاک می‌باشد، و D_T برابر با $0.1 D_L$ است (Phogat et al., 2012; Selim et al., 2013). برای این پژوهش، $D_L = 10$ و $D_T = 1$ در نظر گرفته شد. پخشیدگی مولکولی (D_w) نیز در طول شبیه‌سازی نادیده گرفته شد. توزیع فضایی دوبعدی جذب آب ریشه با استفاده از مدل پیشنهادی ورات و همکاران شبیه‌سازی گردید (Vrugt et al., 2001):

$$b(r, z) = \left[\left(1 - \frac{z}{z_m} \right) \right] \left[\left(1 - \frac{r}{r_m} \right) \right] e^{-\left(\frac{P_z}{z_m} |z^* - z| + \frac{P_r}{r_m} |r^* - r| \right)} \quad (6)$$

که $b(r, z)$ بیان کننده توزیع فضایی دوبعدی جذب آب ریشه به صورت (بدون واحد)، z_m و r_m حداکثر عمق و طول شعاعی ریشه‌دوانی و P_z ، z^* ، P_r و r^* پارامترهای تجربی هستند. z و r عمق

انجام گرفت. دستگاه مذکور شامل ۶ سنجنده هر کدام با دو پروب سوزنی است که در داخل یکی از پروب‌ها یک گرم کننده الکتریکی و یک ترموکوپل قرار دارد و در پروب دیگر هم یک ترموکوپل جای گذاری شده است. این ترموکوپل‌ها برای اندازه‌گیری اختلاف دمای بین دو سنجنده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این اختلاف دما، تحت تاثیر شدت جریان شیره آوندی قرار می‌گیرند. نرم‌افزار دستگاه طوری برنامه‌ریزی گردید که در هر ۵ ثانیه یک قرائت انجام دهد و میانگین قرائت‌های ۱۰ دقیقه را ثبت نماید. در نهایت، مجموع مقادیر اندازه‌گیری شده در طول ۲۴ ساعت به صورت حجم شیره آوندی عبوری از سطح مقطع تنه درخت در طول روز ($cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot day^{-1}$) تعیین گردید.

مدل‌سازی توزیع شوری خاک ناحیه ریشه با استفاده از مدل HYDRUS-2D

مدل HYDRUS-2D یک از مدل‌های شبیه‌سازی است که جریان آب و املاح را در یک، دو و یا سه بعد در شرایط اشباع و غیراشباع با در نظر گرفتن جذب آب توسط ریشه گیاهان شبیه‌سازی می‌کند (Šimůnek et al., 2012). معادله حرکت دوبعدی جریان با فرض خاک همسان و یکنواخت مورد استفاده در این مدل به صورت رابطه ۱ می‌باشد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - S(h) \quad (1)$$

در این رابطه θ : رطوبت حجمی (m^3/m^3)، h : پتانسیل آب خاک (cm)، t : زمان (day)، $S(h)$ عبارت منبع یا مصرف (day^{-1})، x و z : مختصات فضایی (cm) و $k(h)$ تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع (cm/day) است (Phogat et al., 2012).

پارامترهای هیدرولیکی موردنیاز برای حل این معادله طبق توابع ترکیبی معلم - ونگنختن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تعیین (جدول ۱) وارد نرم‌افزار شد. عبارت منبع یا مصرف که همان استخراج آب می‌باشد، بر اساس مدل ترکیبی ضرب‌پذیر^۲ حل گردید. در این روش، وقتی که خاک قادر به تامین مقدار آب موردنیاز گیاه تحت شرایط غالب اقلیمی نباشد، تعرق به کم‌تر از میزان پتانسیل کاهش می‌یابد که طبق تابع ۲ قابل محاسبه است:

$$S(h) = a(h_m, h_o) S_p \quad (2)$$

h_m : مکش ماتریک خاک (cm)، h_o مکش اسمزی و S_p سرعت جذب آب بالقوه می‌باشد که برابر سرعت جذب آب در طول دوره عدم وجود تنش است. تابع $a(h, h_o)$ پاسخ گیاه به تنش آب و شوری، یک تابع بی‌بعد از مکش آب و پتانسیل اسمزی خاک ($0 \leq a \leq 1$) است که در این تحقیق از تابع ضرب‌پذیر پیشنهادی ونگنختن جهت تنش رطوبتی و شوری استفاده شد (Van Genuchten., 1987):

- 1- Sink term
- 2- Multiplicative

جریان خروجی بر سطح ورود آب در بین دو قطره‌چکان به دست آمد که برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی به ترتیب به صورت روابط ۸ و ۹ محاسبه شد (Skaggs et al., 2004; Selim et al., 2013):

$$q = \frac{8 \times 1000 \times 24}{75 \times 2\pi \times 1} = 407.6 \frac{cm}{day} \quad (8)$$

$$q = \frac{8 \times 1000 \times 24}{75 \times 10} = 256 \frac{cm}{day} \quad (9)$$

دبی قطره چکان l/h ، فاصله بین قطره چکان‌ها 75 cm و محیط اشباع شده در اطراف لوله در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برابر با محیط لوله (Skaggs et al., 2004) و در آبیاری قطره‌ای سطحی برابر 10 cm می‌باشد (Selim et al., Phogat et al., 2012; 2013).

به منظور تعیین توزیع شوری شبیه‌سازی برای یک دوره 75 روزه از شروع اولین آبیاری تا زمان نمونه‌برداری صورت گرفت. مقادیر جریان ورودی آب در این دوره، طبق آبیاری‌های انجام شده در مزرعه محاسبه و وارد مدل شد. توزیع رطوبت نیز در دو دور آبیاری متوالی بعد از تعیین توزیع شوری (منطبق به زمان اندازه‌گیری رطوبت و داده‌های گیاهی) شبیه‌سازی گردید.

به منظور واسنجی مدل هایدروس، در محل‌های منطبق با اندازه‌گیری‌ها، نقاط مشاهده‌ای^۲ انتخاب شد و نتایج مدل‌سازی استخراج گردید. در نهایت، صحت مدل با استفاده از آماره‌های حداکثر خطا (ME)، میانگین ریشه دوم خطا (RMSE)، کارایی مدل‌سازی (E) و ضریب تبیین (R^2) بر اساس روابط ۱۰ تا ۱۳ مورد بررسی قرار گرفت.

$$ME = \frac{\sum(O_i - P_i)}{n} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - P_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (13)$$

در این روابط، O_i داده‌های مشاهده‌ای و P_i نتایج برآوردی متناظر می‌باشد.

نتایج و بحث

اندازه‌گیری‌ها نشان داد که در ابتدای فصل رشد، توزیع شوری در مزرعه تقریباً یکنواخت بوده و بیش‌ترین مقدار در لایه سطحی و حدود $6/8 \text{ dS/m}$ است و در لایه‌های زیرین از میزان آن کاسته شده است (شکل ۱). آبیاری‌های سنگین انجام شده در آخر سال به همراه بارندگی‌های زمستانه باعث آب‌شویی املاح و تعدیل شوری ناحیه ریشه گردید.

و فاصله شعاعی از مبدا گیاه (cm) می‌باشند. موقعیت نقطه حداکثر شدت جذب آب (Z^* و r^*) تابعی از فراهمی آب بوده و منطبق بر موقعیت مکانی بیش‌ترین کاربرد آب (در آبیاری‌های غیریکنواخت) می‌باشد (Vrugt et al., 2001; Koumanov et al., 1997) که برای SDI عمق 35 سانتی‌متری و در DI عمق 20 سانتی‌متری در نظر گرفته شد. مقادیر پارامترهای مورد استفاده جهت مدل‌سازی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای توزیع جذب آب ریشه برای آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

سامانه آبیاری	Z^*	r_m	P_z	r^*	Pr
قطره‌ای سطحی	۷۰	۲۰۰	۳,۲۱۴	۴۰	۱/۹۱۸
قطره‌ای زیرسطحی	۷۰	۲۰۰	۳,۲۱۴	۴۰	۱/۹۱۸

برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در طول فصل رشد از نرم‌افزار ET_o Calculator Version 3.2 که در سایت فائو^۱ در دسترس عموم قرار دارد، استفاده شد. همچنین داده‌های اقلیمی موردنیاز از سایت سازمان هواشناسی کشور برای ایستگاه شهریار استخراج شده و در نهایت ET_o برای تمام ماه‌های مختلف سال مورد مطالعه محاسبه گردید.

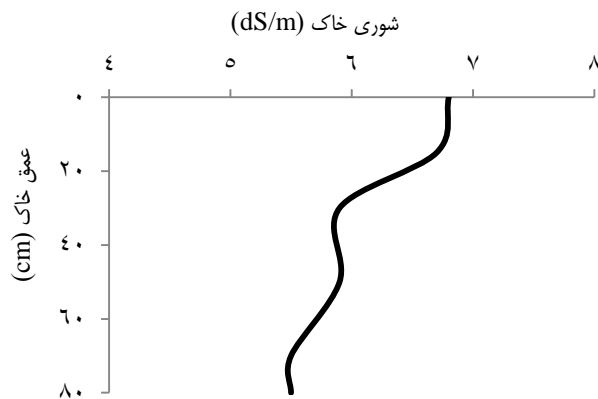
شرایط اولیه و مرزی

مقادیر شوری خاک اندازه‌گیری شده در ابتدای فصل به عنوان شرایط اولیه توزیع شوری استفاده شد. مقدار EC عصاره اشباع (EC_e) اولیه که در آزمایشگاه به دست آمد، توسط رابطه ۷ به شوری محلول خاک (EC_w) تبدیل و وارد مدل شد:

$$EC_w = \frac{\theta_s EC_e}{\theta} \quad (7)$$

θ_s رطوبت اشباع حجمی و θ رطوبت حجمی (m^3/m^3) می‌باشد. در پایان شبیه‌سازی، از رابطه فوق برای تبدیل خروجی نرم‌افزار (EC_w) به EC_e استفاده شد تا بتوان با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه نمود.

مدل‌سازی برای محدوده یک قطره‌چکان به عمق 100 سانتی‌متر و عرض $2/5$ متر (نصف فاصله بین ردیف درختان) انجام شد. مرزهای عمودی بدون جریان در نظر گرفته شد. در حاشیه پایینی محدوده جریان، شرایط مرزی زهکشی آزاد تنظیم گردید. برای حاشیه بالایی محدوده جریان، شرایط مرزی اتمسفری (فقط تبخیر و تعرق و بارندگی) در نظر گرفته شد. شرایط مرزی برای نقاط قرارگیری قطره‌چکان در هنگام وجود و عدم وجود جریان متفاوت در نظر گرفته شد. شرایط مرزی برای نقاط قرارگیری قطره‌چکان در زمان نبود آبیاری شرایط مرزی عدم جریان و در هنگام آبیاری از تقسیم نرخ



شکل ۱- میانگین توزیع اولیه شوری خاک در ابتدای فصل رشد

(SF) در روزهای بعد از آبیاری برای دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و زیرسطحی (SDI) و همچنین درختان مرجع یا تیمار خوب آبیاری شده (A) در شکل ۴ آمده است. مشاهده می‌شود که هدایت روزه‌ای و جریان شیره آوندی درختان مرجع (A) در تمام دوره اندازه‌گیری بیش‌تر دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی است. این به دلیل کاهش شوری خاک در این تیمار و همچنین فراهمی بیش‌تر آب می‌باشد. همچنین تجزیه واریانس نشان داد که تغییر سامانه آبیاری باعث ایجاد اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ در پاسخ‌های گیاهی شده است (جدول ۴). بنابراین سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی باعث بهبود شرایط رطوبتی خاک برای گیاه گردید.

همان‌طوری که در شکل ۳ نشان داده شده است، از روز پنجم بعد از آبیاری مقادیر هدایت روزه‌ای و جریان شیره آوندی برای دو تیمار DI و SDI روند کاهشی را نشان می‌دهند که به دلیل کاهش فراهمی آب خاک می‌باشد. این کاهش در هدایت روزه‌ای شدیدتر از جریان شیره آوندی می‌باشد؛ چرا که جریان شیره آوندی در طول شب نیز ادامه دارد و افت پتانسیل آب گیاه را جبران می‌نماید. اما در نیمه‌ی روز، به دلیل نیاز تعرقی زیاد، اولین پاسخ گیاه به کمبود رطوبت خاک بستن روزه‌ها می‌باشد (Parry., 2014).

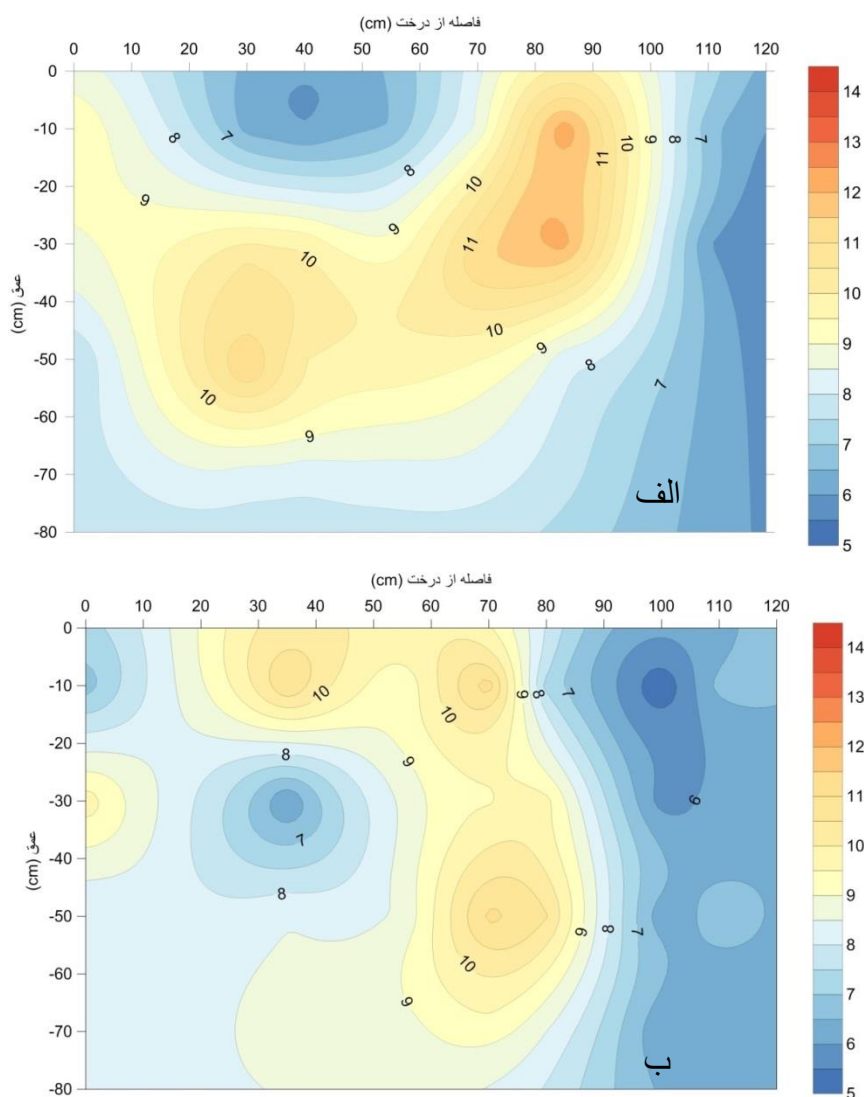
شکل ۳ نشان می‌دهد که نوسانات هدایت روزه‌ای در روزهای مختلف بیش‌تر از جریان شیره آوندی می‌باشد. به عبارت دیگر، هدایت روزه‌ای تأثیرپذیری بیش‌تری از شرایط محیطی و به‌ویژه رطوبت خاک دارد. کووان، و توزت و همکاران بیان کردند که اثرات ترکیبی دمای برگ، شدت نور، غلظت دی‌اکسید کربن بین سلولی و کمبود فشار بخار اتمسفر و همچنین پتانسیل آب خاک باعث تغییر هدایت روزه‌ای گیاه می‌شود (Tuzet et al., Cowan., 1977). (2003;

با شروع آبیاری‌ها و وارد شدن آب شور به ناحیه ریشه جهت تامین نیاز رطوبتی گیاه، رفته رفته بر شوری خاک افزوده شد. با حرکت آب، املاح نیز همراه با آب حرکت کرده و از محل قطره‌چکان دور شدند. بنابراین کم‌ترین میزان شوری در نواحی نزدیک به قطره‌چکان مشاهده شد. با دور شدن از قطره‌چکان سرعت حرکت آب کند شده و با تبخیر و جذب آب توسط ریشه گیاه، املاح آب در خاک ترسیب یافته و باعث افزایش شوری خاک گردیدند. بنابراین بیش‌ترین شوری در حاشیه‌های ناحیه خیس شده مشاهده شد (شکل ۲).

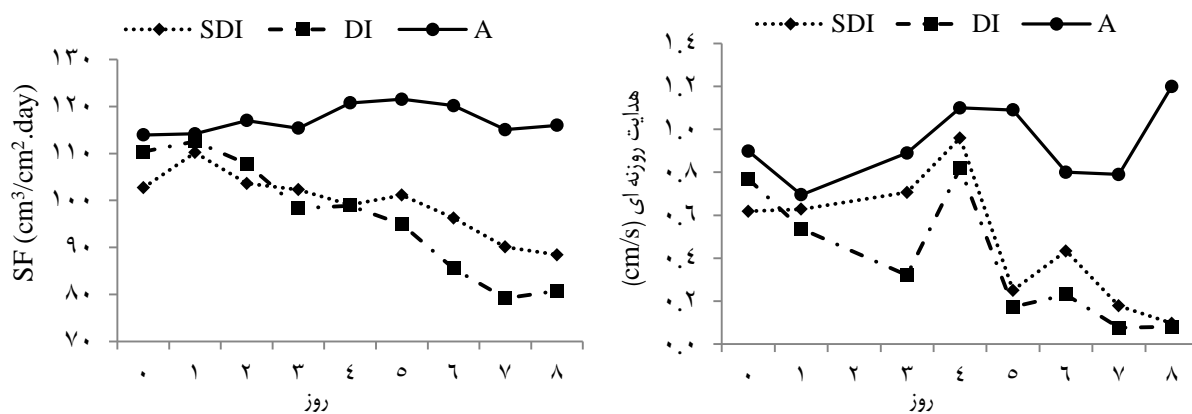
در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی، کم‌ترین میزان شوری در لایه ۰-۲۰ سانتی‌متری و در فاصله ۱۰ تا ۷۰ سانتی‌متری از درخت مشاهده شد. همچنین بیش‌ترین تجمع املاح در عمق ۵۰-۸۰ سانتی‌متری زیر قطره‌چکان و در فاصله ۸۰ سانتی‌متری درخت از سطح تا عمق ۶۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. بیش‌ترین هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در این سامانه ۱۲/۳۲ dS/m بود که مربوط به حاشیه جریان می‌باشد (شکل ۲-الف). در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، کم‌ترین میزان هدایت الکتریکی در عمق ۲۰ تا ۶۰ سانتی‌متری و فاصله ۱۰ تا ۶۰ سانتی‌متری از درخت اندازه‌گیری شد و مشاهده گردید که تجمع املاح در لایه سطحی خاک اتفاق افتاده است. همچنین حداکثر مقدار EC_e اندازه‌گیری شده در این سامانه ۱۱/۲۶ dS/m بود که کم‌تر از مقدار مشابه برای آبیاری قطره‌ای سطحی است (شکل ۲-ب). مشاهدات حاصل از این مطالعه با نتایج اورن و همکاران برای آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی (Oron et al., 1999)، سلیم و همکاران برای آبیاری قطره‌ای سطحی (Selim et al., 2013)، هانسون و می برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (Hanson and May., 2004) تطابق دارد.

پاسخ گیاهی به شرایط رطوبتی خاک

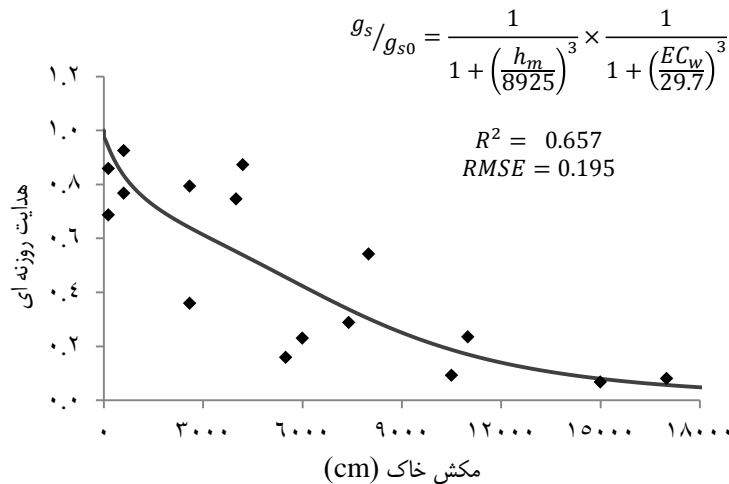
میانگین تغییرات هدایت روزه‌ای (g_s) و جریان شیره آوندی



شکل ۲- تغییرات توزیع شوری خاک در دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی (الف) و زیرسطحی (ب)



شکل ۳- میانگین تغییرات هدایت روزنه‌ای نیم‌روز (g/s) و جریان شیره آوندی (SF) در روزهای پس از آبیاری



شکل ۴- تغییرات هدایت روزنه‌ای نسبی درختان پسته به صورت تابعی از مکش ماتریک و شوری خاک

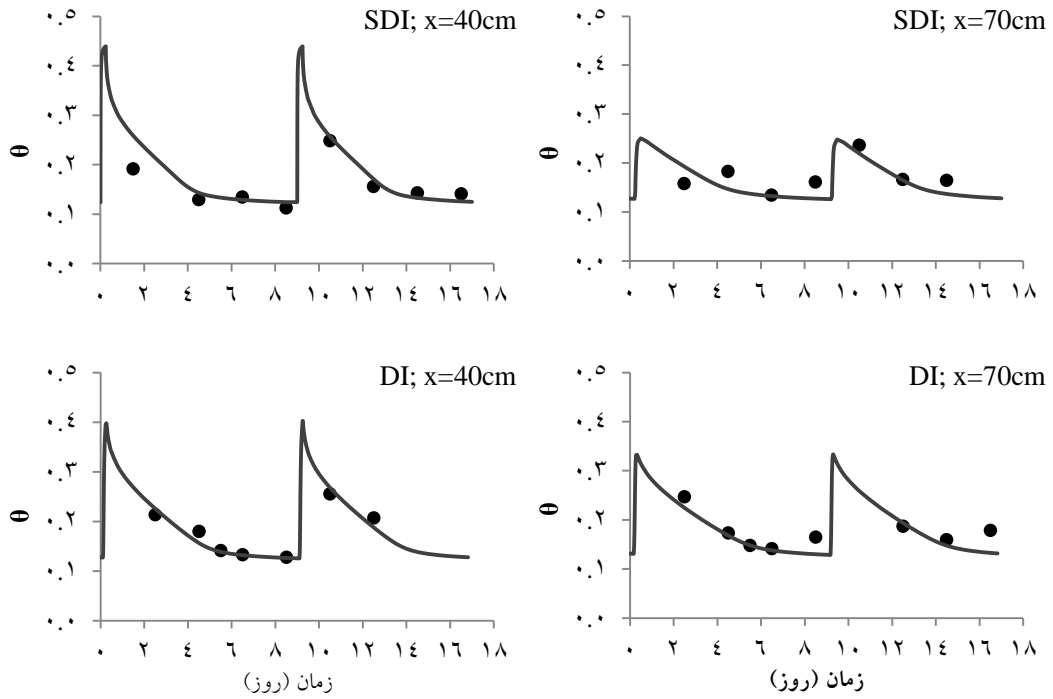
جدول ۳ مقادیر پارامترهای صحت‌سنجی را برای مقایسه نتایج مدل‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، مشاهده می‌شود که مدل‌سازی توزیع رطوبت خاک با دقت بیش‌تری نسبت به توزیع شوری انجام شده است. ضرایب R^2 و ME بیش‌تر و E کم‌تر در توزیع شوری نشان می‌دهد که مدل روند توزیع شوری را بهتر از توزیع رطوبت برآورد کرده است. اما در بیش‌تر نقاط دارای کم‌برآوردی می‌باشد. از طرفی، کم بودن R^2 در توزیع رطوبت می‌تواند به دقت کم‌تر اندازه‌گیری رطوبت خاک مربوط باشد. دقت اندازه‌گیری رطوبت توسط دستگاه پروفیل پروب متاثر از چگونگی نصب لوله‌های رطوبت‌سنج، حضور عوامل ناشناخته (ازجمله سنگ، ریشه و فضای خالی) در اطراف لوله‌های نصب شده و دقت خود دستگاه می‌باشد. تغییرات فضایی شرایط رطوبتی خاک، تخریب ساختار خاک با نصب سنجنده‌های رطوبت‌سنج و حضور ارگانسیم‌های زنده، می‌تواند از دیگر عوامل ایجاد خطا در مدل‌سازی می‌باشند (Yang et al., 2013; Fujimaki et al., 2008). علاوه بر این، خطای موجود در خود مدل از قبیل فرض‌های موجود در معادله جذب آب ریشه از قبیل جذب متقارن آب توسط ریشه و وجود یک نقطه با حداکثر شدت جذب (Vrugt et al., 2001)، می‌تواند دلیل متفاوت بودن شدت جذب آب ریشه برآوردی با مقادیر واقعی باشد و سبب ایجاد خطا شود. علی‌رغم وجود تمام خطاها، مدل‌سازی توزیع رطوبت و شوری ناحیه درختان پسته در شرایط مزرعه که تحت مدیریت کامل باغ‌دار بوده است، با دقت خوبی انجام شده است و نشان دهنده قابلیت بالای مدل هایدروس در شرایط پیچیده می‌باشد. فوگات و همکاران، ابولایلا و همکاران و سلیم و همکاران نیز دقت بالای HYDRUS-2D را در مدل‌سازی تغییرات رطوبت و شوری خاک بیان کردند (Selim et al., AbouLila et al., 2012; Phogat et al., 2012).

از آن‌جایی که اثرات محیطی، غیر از رطوبت خاک، در هر سه تیمار یکسان است، با تقسیم هدایت روزنه‌ای در درختان SDI و DI به درختان مرجع (A)، اثرات محیطی بر هدایت روزنه‌ای نرمال می‌شود (Chahal., 2010). چاهال نشان داد که از این نسبت (g_s/g_{s0}) می‌توان برای به‌دست آوردن تابع پاسخ گیاه به شرایط رطوبتی خاک استفاده کرد (Chahal., 2010). برای این منظور، معادله ۳ با استفاده از برازش منحنی^۱ نرم‌افزار متلب به داده‌های نرمال شده هدایت روزنه‌ای به صورت تابعی از میانگین شوری و مکش ماتریک خاک در دو سامانه آبیاری برازش داده شد. اندازه‌گیری‌ها برازش نسبتاً خوبی را به معادله نشان دادند و پارامترهای h_{m50} و EC_{50} به ترتیب ۸۹۲۵ سانتی‌متر و ۲۹/۷ دسی‌زیمنس بر متر به-دست آمد (شکل ۵). این شکل نشان داد که با استفاده از هدایت روزنه‌ای می‌توان تابع کاهش جذب آب درخت پسته در اثر تنش شوری و خشکی را در شرایط مزرعه با دقت مناسبی به دست آورد.

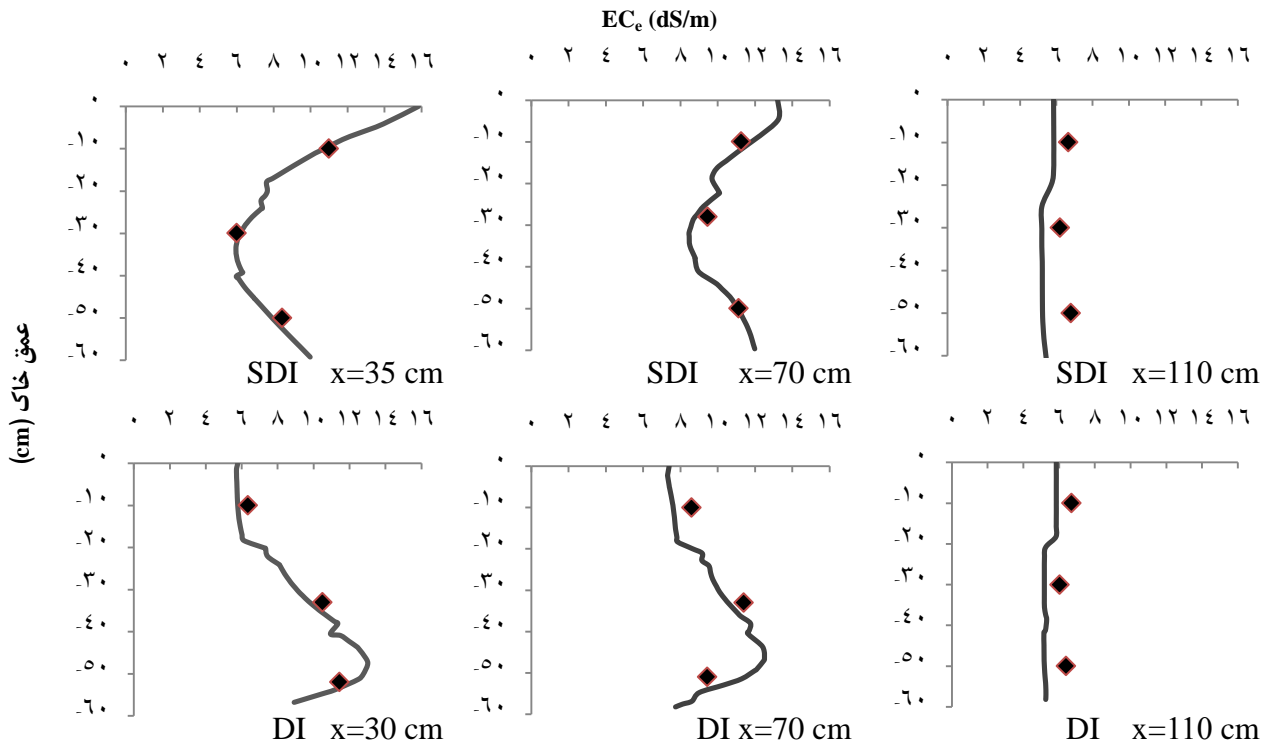
مدل‌سازی توزیع رطوبت و شوری خاک

در ادامه، با ورود پارامترهای تعیین شده به نرم‌افزار هایدروس، توزیع رطوبت و شوری ناحیه ریشه برای دو سامانه DI و SDI مدل‌سازی گردید. نمودارهای ارایه شده در شکل ۵ روند تغییرات رطوبت خاک حاصل از هایدروس را در عمق ۳۰ و فواصل ۴۰ و ۷۰ سانتی‌متری نسبت به درخت برای هر دو سامانه آبیاری در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. هم‌چنین، مقادیر شوری مدل‌سازی شده در مقایسه با مقادیر ECE اندازه‌گیری شده در اعماق مختلف با فاصله ۳۵، ۷۰ و ۱۱۰ سانتی‌متری از درخت در شکل ۶ نشان داده شده است.

1- Curve fitting tool



شکل ۵ - تغییرات رطوبت θ (m^3/m^3) اندازه‌گیری (\bullet) و مدل‌سازی شده (—) در فواصل مختلف از درخت در عمق ۳۰ سانتی‌متر



شکل ۶ - مقایسه شوری شبیه‌سازی شده (—) و اندازه‌گیری شده (\blacklozenge) در عمق و فواصل مختلف (x) از درخت
DI: آبیاری قطره‌ای سطحی؛ SDI: آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

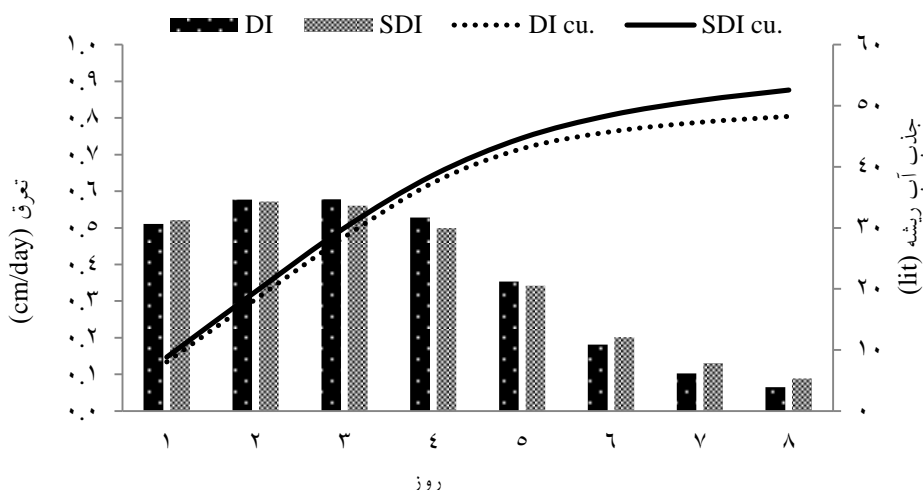
جدول ۳- مقادیر آماره‌های واسنجی برای مدل هیدروس در دو سامانه آبیاری

سامانه آبیاری	ME	RMSE	E	R ²
رطوبت	۰/۰۰۶	۰/۰۲۱	۰/۷۶۱	۰/۷۹۴
رطوبت	-۰/۰۰۲	۰/۰۲۰	۰/۷۰۰	۰/۷۴۱
شوری	۰/۲۲۱	۱/۱۳۶	۰/۶۶۴	۰/۸۰۵
شوری	۰/۲۵۵	۱/۵۶۶	۰/۴۵۶	۰/۸۳۳

جذب آب ریشه

از نتایج مدل هیدروس، برآورد تعرق گیاهی و جذب آب ریشه می‌باشد. شکل ۷، خروجی هیدروس را برای تعرق روزانه گیاه و جذب آب تجمعی در یک دوره آبیاری در دو سامانه DI و SDI نشان می‌دهد. مدل‌سازی نشان می‌دهد که در SDI آب بیش‌تری نسبت به DI جذب گیاه می‌شود که از نظر آماری در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشد (جدول ۴). این نتایج می‌تواند به دلیل ناچیز بودن تبخیر از سطح

خاک و تطابق بهتر الگوی جذب آب ریشه با الگوی توزیع رطوبت و شوری خاک باشد. به عبارت دیگر، قرار گرفتن منبع ورود آب در لایه زیرسطحی، ضمن این‌که باعث کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شود، حجم بیش‌تری از خاک را که مرتبط با جذب آب ریشه است، مرطوب می‌کند. هم‌چنین، با انتقال املاح به نواحی دورتر از مرکز جذب آب ریشه، ناحیه دارای EC زیر حد آستانه تحمل گیاه پسته (۹ dS/m) را در قسمت‌های منطبق با بیش‌ترین جذب آب ریشه گسترش می‌دهد.



شکل ۷- تعرق روزانه (نمودار ستونی) و آب جذب شده توسط ریشه (نمودار خطی) محاسبه شده با هیدروس برای سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس هدایت روزانه‌ای، جریان شیره آوندی و جذب آب ریشه در دو سامانه آبیاری DI و SDI

جذب آب ریشه		جریان شیره آوندی		هدایت روزانه‌ای	
میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	درجه آزادی
۱۲/۴۸۸**	۱۶	۲۲۴/۶*	۲۳	۰/۴۳۳**	۱۱
۱۸۵۷**	۱	۴۳۱/۰۵**	۱	۰/۲۰۹**	۱

* معنی‌داری در سطح ۵٪ و ** معنی‌داری در سطح ۱٪

پاسخ‌گوی کامل نیاز گیاهی نبوده و گیاه با بستن روزنه‌ها و کاهش تعرق با کمبود رطوبت مقابله می‌کند. اسماعیل‌پور و همکاران نیز مشاهده کردند که تنش خشکی به طور معنی‌داری باعث کاهش میزان فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای در درختان پسته می‌گردد که با نتایج

همان‌طوری که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، از روز پنجم به بعد، کاهش چشم‌گیری در میزان تعرق و جذب آب ریشه رخ می‌دهد. پاسخ‌های گیاهی اندازه‌گیری شده نیز نتیجه مشابهی را نشان می‌دهند. این بدان معنی است که رطوبت خاک از روز چهارم به بعد

روزنه‌ای و حرکت شیره آوندی، در مقایسه با رطوبت و مکش خاک، همواره شاخص بهتری از شرایط رطوبتی گیاه می‌باشد (Parry, 2014). اندازه‌گیری این پاسخ‌ها نیز نتایج مشابهی را با مدل هایدروس نشان داد. در جدول ۵ نتایج حاصل از آزمون همبستگی بین پاسخ‌های گیاهی و نتایج مدل‌سازی آورده شده است. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که بین هدایت روزنه‌ای و جریان شیره آوندی همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. همبستگی مثبت بین این دو پارامتر توسط اسکالونا و همکاران و سوسا و همکاران گزارش شده است (Sousa et al., 2006; Escalona et al., 2002)

این تحقیق مطابقت دارد (Esmailpour et al., 2015). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که دور آبیاری اعمال شده در مزرعه طولانی است و نیاز آبی گیاه کاملاً تامین نمی‌شود. لازم به ذکر است که اصول طراحی آبیاری قطره‌ای بر مبنای دور کوتاه آبیاری و توزیع یکنواخت آب می‌باشد که در اغلب باغ‌ها به دلیل محدودیت منابع آب، دور آبیاری مشابه آبیاری سطحی انجام شده و این سامانه فقط جهت توزیع یکنواخت آب استفاده می‌شود. این مساله باعث می‌شود که از پتانسیل تولید در روش آبیاری قطره‌ای استفاده نشود. تغییر سامانه آبیاری از قطره‌ای سطحی به زیرسطحی می‌تواند با بهبود الگوی توزیع رطوبت و شوری، محدودیت جذب آب را کاهش دهد. پاسخ فیزیولوژیک گیاه به فراهمی آب خاک از قبیل هدایت

جدول ۵- همبستگی پیرسون بین پاسخ‌های گیاهی و نتایج مدل هایدروس

سامانه آبیاری	SF	gs	T	RWU
زیر سطحی	SF	۰/۶۵۴*	۰/۸۸۳**	۰/۸۹۴**
	gs	۱	۰/۷۵۲*	۰/۷۳۵*
	T	۰/۸۸۳**	۱	۰/۹۹۷**
	RWU	۰/۸۹۴**	۰/۷۳۵*	۱
سطحی	SF	۰/۷۶۱*	۰/۹۳۵**	۰/۹۲۴**
	Gs	۱	۰/۶۸۱*	۰/۶۳۸
	T	۰/۹۳۵**	۱	۰/۹۹۷**
	RWU	۰/۹۲۴**	۰/۶۳۸	۱

SF: جریان شیره آوندی، gs: هدایت روزنه‌ای، T: تعرق به‌دست آمده از هایدروس و RWU: جذب آب ریشه به‌دست آمده از هایدروس
* معنی‌داری در سطح ۵٪ و ** معنی‌داری در سطح ۱٪

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضمن اندازه‌گیری توزیع رطوبت و شوری خاک در ناحیه ریشه باغ پسته، از نرم‌افزار هایدروس جهت مدل‌سازی توزیع رطوبت و شوری و همچنین جذب آب ریشه و تعرق روزانه استفاده شد. استفاده از هدایت روزنه‌ای جهت استخراج پارامترهای گیاهی موردنیاز برای مدل‌سازی باعث برآورد دقیق‌تر پارامترها و افزایش دقت مدل گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که با کاربرد مدل هایدروس برای شرایط باغ و تحت مدیریت باغ‌دار نیز می‌توان چگونگی انتقال آب و املاح در اطراف قطره‌چکان واقع در سطح یا زیرسطح خاک را بررسی و برآورد دقیقی از میزان رطوبت و شوری ناحیه ریشه به‌دست آورد. همچنین جذب آب ریشه و میزان تعرق گیاهی برآورد شده با استفاده از این نرم‌افزار همبستگی خوبی با پاسخ‌های گیاهی و به‌ویژه با جریان شیره آوندی نشان داد. بنابراین در صورت تعیین دقیق پارامترهای ورودی، نرم‌افزار هایدروس قادر است علاوه بر بررسی توزیع رطوبت و شوری، جهت ارزیابی شرایط رطوبتی گیاه نیز مورد استفاده قرار گیرد.

جریان شیره آوندی در مقایسه با هدایت روزنه‌ای، همبستگی بهتری را با نتایج مدل‌سازی نشان داد. این نتیجه به دلیل ماهیت متفاوت این دو پاسخ گیاهی می‌باشد. از آنجایی که هدایت روزنه‌ای در نیمه روز اندازه‌گیری شده است و نشان دهنده سریع‌ترین پاسخ گیاه به شرایط رطوبتی خاک می‌باشد (Esmailpour et al., 2015; Flexas et al., 2002)، دارای نوسانات زیادی است. اما جریان شیره آوندی به صورت پیوسته اندازه‌گیری شده و کاهش رطوبت خاک با افزایش جذب آب شبانه جبران شده و افت یک‌باره در این شاخص مشاهده نمی‌گردد. در پژوهشی روی درخت بادام، فونتس و همکاران نیز مشاهده کردند که با کاهش پتانسیل آب خاک، سرعت صعود شبانه شیره آوندی افزایش می‌یابد (Fuentes et al., 2013). بنابراین اندازه‌گیری جریان شیره آوندی برآورد مستقیمی از جذب آب توسط گیاه به‌دست می‌دهد که با نتایج مدل‌سازی جذب آب نیز همبستگی خوبی دارد.

- Cowan, I.R. 1977. Stomatal behaviour and environment. *advances in botanical research*. 4: 117-228.
- Escalona, J.M., Flexas, J. and Medrano, H. 2002. Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines. *vitis*. 41: 57-62.
- Esmailpour, A., Van Labeke, M.C., Samson, R. and Van Damme, P. 2015. Osmotic stress affects physiological responses and growth characteristics of three pistachio cultivars. *acta physiologiae plantarum*. 37: 123-137.
- Flexas, J., Bota, J., Escalona, J.M., Sampol, B. and Medrano, H. 2002. Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations. *functional plant biology*. 29: 461-471.
- Fuentes, S., Mahadevan, M., Bonada, M., Skewes, M.A. and Cox, J.W. 2013. Night-time sap flow is parabolically linked to midday water potential for field-grown almond trees. *irrigation science*. 31.6: 1265-1276.
- Fujimaki, H., Ando, Y., Cui, T.B. and Inoue, M. 2008. Parameter estimation of a root water uptake model under salinity stress. *vadose zone journal*. 7: 31-38.
- 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: 1-17.
- Hassan, G., Persaud, N. and Reneau, R. 2005. Utility of HYDRUS-2D in modeling profile soil moisture and salinity dynamics under saline water irrigation of soybean. *soil science*. 170: 28-37.
- Iniesta, F., Testi, L., Goldammer, D.A. and Fereres, E. 2008. Quantifying reductions in consumptive water use under regulated deficit irrigation in pistachio (*Pistacia vera* L.). *agricultural water management* 95: 877-886.
- Koumanov, K.S., Hopmans, J.W., Schwankl, L.J., Andreu, L. and Tuli, A. 1997. Application efficiency of micro-sprinkler irrigation of almond trees. *agricultural water manage*. 34: 247-263.
- Lekakis, E. and Antonopoulos, V. 2015. Modeling the effects of different irrigation water salinity on soil water movement, uptake and multicomponent solute transport. *journal of hydrology*. 530: 431-446.
- Lemur, R., Ranjbar, A. and Van Damme, P. 2001. Ecophysiological characteristics of two pistachio species (*Pistacia khinjuk* and *Pistacia mutica*) in response to salinity. pp. 179-187. in: ak be (ed.). XI grempa seminar on pistachios and almonds. zaragoza: ciheam, (cahiers options méditerranéennes; n. 56).
- Lu, P., Urban, L. and Zhao, P. 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *acta botanica*
- مدل سازی های جذب آب ریشه و اندازه گیری پاسخ های گیاهی در دو سامانه آبیاری قطره ای سطحی و زیرسطحی نشان داد که توزیع رطوبت و شوری خاک در سامانه آبیاری قطره ای زیرسطحی با الگوی جذب آب ریشه درختان پسته سازگاری مناسبی دارد. به نحوی که باعث تغییر معنی دار جذب آب ریشه و کاهش تنش رطوبتی گردید. همچنین، مشخص شد که از روز پنجم بعد از آبیاری، کاهش فراهمی آب خاک باعث کاهش جذب آب ریشه و تعرق می شود. اگر چه در این شرایط لازم است که دور آبیاری کاهش یابد، به دلیل محدودیت منابع آب، باغداران دور مناسب آبیاری را رعایت نمی کنند و این مساله باعث می شود که در روزهای آخر جذب آب توسط گیاه با محدودیت مواجه شود. تغییر سامانه آبیاری از قطره ای سطحی به زیرسطحی، راه حلی است که می تواند با تغییر الگوی توزیع رطوبت و شوری باعث افزایش فراهمی آب برای گیاه و کاهش محدودیت جذب آب شود.
- ### منابع
- سیفی، ا.، میرلطیفی، س.م.، دهقانی سانجیح، ح. و ترابی، م. ۱۳۹۳. تاثیر دور آبیاری بر توزیع رطوبت و شوری در باغ های پسته تحت شرایط آبیاری قطره ای زیرسطحی (مطالعه موردی: شهرستان سیرجان استان کرمان). *آبیاری و زهکشی ایران*. ۸. ۴: ۷۸۶-۷۹۹.
- طباطبایی، س.ح.، مستشفی حبیب آبادی، ف.، شایان نژاد، م. و دهقانی، م. ۱۳۹۵. اثر چهار رژیم تلفیقی آبیاری با آب شور بر الگوی توزیع شوری خاک در شرایط کشت گیاه. *علوم آب و خاک*. ۲۰. ۷۵: ۱۷۱-۱۸۵.
- Abdou, H.M. and Flury, M. 2004. Simulation of water flow and solute transport in free-drainage lysimeters and field soils with heterogeneous structures. *European journal of soil science*. 55: 229-241.
- AbouLila, T.S., Berndtsson, R., Persson, M., Somaida, M., El-Kiki, M., Hamed, Y. and Mirdan, A. 2012. Numerical evaluation of subsurface trickle irrigation with brackish water. *Irrigation Science*. 31: 1125-1137.
- Burt, C.B. 1996. Drip irrigation on pistachios (research report), California Polytechnic State University. CA, WS.
- Chahal, S.S. 2010. Evaluation of soil hydraulic limitations in determining plant-available-water in light textured soils. PhD thesis. School of agriculture, food and wine. The university of Adelaide, Australia.
- Chen, L.J., Feng, Q., Li, F.R. and Li, C.S. 2014. A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water. *agricultural water management*. 146: 24-33.

- Sousa, T.A., Oliveira, M.T and Pereira, J.M. 2006. Physiological indicators of plant water status of irrigated and non-irrigated grapevines grown in a low rainfall area of Portugal. *Plant and Soil*. 282: 127–134.
- Tognetti, R., diAndria, R., Morelli, G., Calandrelli, D and Fragnito, F. 2004. Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. *Plant Soil*. 263: 249–264.
- Tuzet, A., Perrier, A and Leuning, R. 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell and Environment*. 26: 1097–1116.
- 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.
- Van Genuchten, M.T. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service US Salinity Laboratory.
- Van Genuchten, M.Th and Gupta, S.K. 1993. A reassessment of the crop tolerance response function. *Indian Society of Soil Science*. 4: 730–737.
- Volpe, V., Manzoni, S., Marani, M and Katul, G. 2011. Leaf conductance and carbon gain under salt-stressed conditions. *Journal of Geophysical Research*. 116: 1–12.
- Vrugt, J.A., Hopmans, J.W and Simunek, J. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of America Journal*. 65: 1027–1037.
- Yang, Y., Guan, H., Hutson, J.L., Wang, H., Ewenz, C., Shang, S and Simmons, C.T. 2013. Examination and parameterization of the root water uptake model from stem water potential and sap flow measurements. *Hydrological Processes*. 27: 2857–2863.
- sinica-english edition. 46: 631–646.
- Nang, N.D. 2012. Plant availability of water in soils being reclaimed from the saline-sodic state. PhD thesis. The University of Adelaide, Australia.
- Oron, G., DeMalach, Y., Gillerman, L., David, I and Rao, V. 1999. Improved saline-water use under subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 39: 19–33.
- Parry, C.K. 2014. Biophysically-based measurement of plant water status using canopy temperature. PhD thesis, Utah State University. All graduate theses and dissertations.
- Phogat, V., Mahadevan, M., Skewes, M and Cox, J.W. 2012. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design. *Irrigation Science*. 30: 315–333.
- Roberts, T., Lazarovitch, N., Warrick, A and Thompson, T. 2009. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D. *Soil Science Society of America Journal*. 73: 233–240.
- 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.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M.T and Šejna, M. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal*. 7: 587–600.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M.T and Šejna, M. 2012. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, version 1, 241..
- 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.

Pistachio Response to Water and Salinity Distribution in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems

A .Ataee^{*1}, M. Akbari², M.R. Neyshabouri³, D. Zarehagi⁴, A. Onnabi Milani⁵

Received: Jul.19, 2018

Accepted: Sep.24, 2018

Abstract

In this study, soil water and salinity distribution in surface drip irrigation (DI) and subsurface drip irrigation (SDI) systems with saline water were investigated. Plant measurements were used to obtain water stress response function parameters that are needed for HYDRUS-2D modeling. The h_{m50} and EC_{50} parameters that are the 50% reduction of water extraction due to pressure head and salinity, were calculated 8925 cm and 29.7 dS/m, respectively. HYDRUS successfully simulates soil water and salinity distribution in pistachio trees root zone. The results showed that in the immediate vicinity of the emitter, the soil salinity varies in a relatively low range and salt accumulation was observed far from the emitters. Also HYDRUS calculates daily transpiration and root water uptake that they were significantly correlated with stomatal conductance and sap flow. Plant measurements and HYDRUS results show that roots water uptake in SDI significantly was more than DI. Therefore, using SDI, by decreasing surface evaporation and conducting appropriate water and salt distribution in root zone reduce water and salinity stress. Furthermore, results revealed that soil moisture reduction after five days from irrigation, lead to limitation in root water uptake. so, it is necessary to decrease irrigation period from that applied in the field.

Keywords: HYDRUS, Root water uptake, Transpiration, Water Stress Response Function

1-PhD Student Department of Soil Science, College of Agriculture, Tabriz University

2- Agricultural Engineering Research Institute(AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj

3- Professor, Department of Soil Science, of Agriculture, Tabriz University, Tabriz

4- Assistant Professor, Department of Soil Science, of Agriculture, Tabriz University, Tabriz

5- Assistant Professor, Soil and Water Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz

(*- Corresponding Author Email: aliaataee.kh@gmail.com)