

ارزیابی مدل هایدروس دو بعدی برای تعیین توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای

سطحی و زیر سطحی درختان پسته

علی عطایی^{۱*}، محمدرضا نیشابوری، مهدی اکبری، داود زارع حقی و اژدر عنابی میلانی

دانشجوی دکتری دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک.

aliataee.kh@gmail.com

استاد گروه خاک شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

neyshmr@hotmail.com

دانشیار موسسه فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج-ایران.

akbari_m43@yahoo.com

استادیار گروه خاک شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

davoodzarehagi@yahoo.com

استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

تبریز، ایران. a_o_milani@yahoo.com

چکیده

طبیعت چندبُعدی حرکت آب در خاک، جذب آب توسط گیاه و کاربرد آب در مزرعه، باعث افزایش پیچیدگی‌های مدل‌سازی توزیع رطوبت خاک در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای می‌شود. با تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک، پارامترهای توزیع ریشه درخت پسته در مزرعه مورد مطالعه، میزان تبخیر و تعرق و جریان آب ورودی، چگونگی توزیع رطوبت خاک در دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و زیرسطحی (SDI) با استفاده از مدل هایدروس دو بُعدی مدل‌سازی گردید. همچنین مقادیر رطوبت خاک در روزهای متوالی پس از آبیاری، در فواصل عرضی و عمقی متفاوت نسبت به درخت با استفاده از رطوبت سنج پروفیل پروب اندازه‌گیری شد. از هدایت روزنه‌ای برگ درختان نیز برای استخراج تابع تنش رطوبتی و ارزیابی مدل استفاده شد. براین اساس، مکش معادل کاهش ۵۰ درصد جذب آب ریشه برابر ۴۹۳۵ سانتی‌متر بدست آمد. نتایج مدل‌سازی در محل‌های منطبق با اندازه‌گیری‌ها با داده‌های رطوبت خاک مقایسه شد و با استفاده از آماره‌های صحت سنجی، صحت و دقت مدل مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر E ، $RMSE$ ، ME و R^2 برای SDI به ترتیب ۰/۰۰۶، ۰/۰۲۱، ۰/۰۷۶۱، ۰/۰۷۹۴ و برای DI ۰/۰۰۲، ۰/۰۲۰، ۰/۰۷۰۰ و ۰/۷۴۱ به دست آمد. تعرق محاسبه شده توسط هایدروس همبستگی بالایی را با هدایت روزنه‌ای به ویژه در SDI نشان داد. براساس نتایج هایدروس و اندازه‌گیری گیاهی مشخص شد که جذب آب توسط ریشه درخت پسته در SDI به طور معنی‌داری از DI بیشتر است که نشان می‌دهد استفاده از SDI می‌تواند با کاهش تبخیر از سطح خاک، باعث صرفه جویی و افزایش کارایی مصرف آب گردد. برآورد جذب آب ریشه و اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای درخت پسته در شرایط مزرعه مشخص کرد که رطوبت خاک تا چهارروز بعد از آبیاری قطره‌ای به خوبی پاسخگوی نیاز گیاهی بوده و با کوتاه‌تر کردن دور آبیاری می‌توان از بیشترین پتانسیل این سامانه آبیاری بهره برد.

واژه‌های کلیدی: پاسخ گیاهی، جذب آب ریشه، هدایت روزنه‌ای برگ، مدل‌سازی

۱- آدرس نویسنده مسئول: تبریز، گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

* - دریافت: فروردین ۱۳۹۷ و پذیرش: مرداد ۱۳۹۷

مقدمه

عدم وجود اطلاعات کافی در مورد تغییرات زمانی و مکانی مقدار رطوبت خاک، باعث مدیریت نامناسب و کارایی پایین مصرف آب در سامانه آبیاری قطره‌ای می‌شود. حجم خاک مرطوب شده و شکل توزیع مکانی آب خاک تحت این سامانه آبیاری، با خصوصیات هیدرولیکی خاک، سرعت تخلیه آب از قطره‌چکان‌ها، فاصله بین قطره‌چکان‌ها، موقعیت قطره‌چکان‌ها (زیر یا سطح خاک)، تناوب و مقدار آبیاری، سرعت جذب آب توسط گیاه و الگوی توزیع ریشه تغییر می‌کند (سوبا، ۲۰۱۳).

الگوی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای سطحی، ترکیبی از اثرات صفات خاکی و خصوصیات ریشه است. به دلیل وجود رطوبت زیاد در نزدیکی قطره‌چکان و نفوذ عمقی آب، یک نوار طولانی باریک در امتداد خط قطره‌چکان‌ها، در پروفیل خاک ایجاد می‌شود. در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، پروفیل رطوبتی در اطراف قطره‌چکان، به دلیل اثر ثقلی شکل بیضی‌های هم‌مرکز به خود می‌گیرد (اورن و هایدروس فرم اصلاح شده معادله ریچاردز را برای شرایط اشباع - غیراشباع جریان آب با در نظر گرفتن جذب آب توسط ریشه گیاهان حل می‌کند (سلیم و همکاران، ۲۰۱۳).

مدل هایدروس دو بعدی همزمان چندین پدیده انتقال املاح از قبیل جذب غیرخطی و غیر متعادل^۱ یون‌ها را نیز شبیه‌سازی می‌کند (ربرتز و همکاران، ۲۰۰۹).

مدل هایدروس دو بعدی و سه بعدی در مطالعات پیشین شبیه‌سازی جریان آب در سامانه آبیاری قطره‌ای موفق عمل کرده است (اسکگز و همکاران، ۲۰۰۴؛ ربرتز و همکاران، ۲۰۰۹). مدل مذکور در مقایسه با مدل‌های تجربی و تحلیلی برآورد دقیق‌تری از حرکت آب در آبیاری قطره‌ای ارائه می‌دهد (کندلوس و سیمیونک، ۲۰۱۰). انتقال آب از آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با و بدون در نظر گرفتن جذب آب توسط ریشه گیاهان در بخشی از فصل رویش با موفقیت توسط هایدروس دو بعدی شبیه‌سازی شده است (مولوا و اور، ۲۰۰۳؛ اسکگز و همکاران، ۲۰۰۴؛

کاهش مصرف آب در آبیاری باغ‌ها از طریق کاهش تلفات و افزایش بازده کاربرد آب قابل دستیابی است. بررسی آمار و ارقام توسعه روش‌های آبیاری در ۲۰ سال گذشته، روند رو به رشد استفاده از سامانه‌های میکرو را به ویژه در باغ‌های میوه، نشان می‌دهد (اینستا و همکاران، ۲۰۰۸). امروزه آبیاری قطره‌ای به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های آبیاری شناخته شده است. با این روش می‌توان آب را به‌طور یکنواخت توزیع کرد، مقدار آب مصرفی را به دقت تنظیم نمود، عملکرد گیاه را افزایش و تبخیر-تعرق، نفوذ عمقی و خطرات پراکندگی و شور شدگی خاک را کاهش داد (بچلور و همکاران، ۱۹۹۶؛ آیرس و همکاران، ۱۹۹۹؛ کالبرگ و دوریس، ۲۰۰۴). این سامانه‌های پیشرفته آبیاری شامل آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی می‌باشند و اغلب به منظور غلبه بر مشکلات کمبود آب در نواحی خشک پیشنهاد شده‌اند (کندلوس و سیمیونک، ۲۰۱۰).

همکاران، ۱۹۹۹). اورن و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که پهن‌ترین الگوی توزیع آب مربوط به قطره‌چکان‌های قرار گرفته در عمق ۳۰ سانتی‌متری است. اگرچه اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای قابل اعتماد هستند، اما زمان و هزینه مهم‌ترین موانع انجام این اندازه‌گیری‌ها مخصوصاً در مقیاس‌های بزرگ، طرح‌های مختلف آبیاری و شرایط اقلیمی متفاوت می‌باشد (سلیم و همکاران، ۲۰۱۳). به دلیل محدودیت‌های اجرایی در انجام اندازه‌گیری‌ها برای تشخیص شکل توزیع رطوبت در داخل خاک، استفاده از مدل‌های تحلیلی که با داشتن خصوصیات هیدرولیکی خاک و معادلات حرکت آب در خاک، تخمین قابل قبولی از توزیع رطوبت در خاک ارائه دهند به وسیله محققین زیادی توصیه شده است. یکی از پرطرفدارترین مدل‌ها، معادله ریچاردز برای جریان‌های با درجه اشباع متغیر و معادله پخشیدگی - انتشار فیک برای انتقال املاح می‌باشد. نرم‌افزار

^۱ Nonequilibrium

این پژوهش با هدف مطالعه تغییرات توزیع رطوبت خاک و جذب آب ریشه با تغییر سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی به زیر سطحی و قابلیت مدل هایدروس دو بُعدی در شبیه‌سازی این تغییرات در شرایط پیچیده باغ پسته تحت مدیریت باغدار صورت گرفت. همچنین امکان ارزیابی نتایج مدل و تعیین پارامترهای تابع تنش رطوبتی گیاه با استفاده از هدایت روزنه‌ای برگ درختان مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه مدل هایدروس با استفاده از صفات اندازه‌گیری شده خاک و گیاه شبیه‌سازی را انجام می‌دهد، در صورت صحت سنجی می‌توان از چگونگی توزیع رطوبت در طول دوره رشد مطلع شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سال ۱۳۹۶ در یک باغ پسته ۱۰ هکتاری واقع در دهستان اختراآباد از توابع شهرستان شهریار استان تهران به طول جغرافیایی $37^{\circ} 50'$ شرقی و عرض جغرافیایی $10^{\circ} 34' 35''$ شمالی و ارتفاع ۸۸۰ متر از سطح دریا به اجرا درآمد. باغ ۱۲ ساله بوده و رقم درختان مورد مطالعه احمد آقایی می‌باشد. فاصله بین ردیف درختان چهار تا پنج متر و میانگین فاصله درختان روی ردیف ۱/۲ متر می‌باشد. میانگین، کمترین و بیشترین متوسط دما در طول سال به ترتیب ۱۸/۲، ۵/۹۹- و ۴۱/۳ و درجه سانتی-گراد و متوسط بارندگی سالانه ۱۷۳ میلی‌متر بود (آمار سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۶).

سامانه‌های آبیاری مورد مطالعه

سامانه اصلی آبیاری مورد استفاده در باغ فوق الذکر، آبیاری قطره‌ای سطحی، به صورت دو ردیفه در دو طرف ردیف درختان با فواصل ۵۰ سانتی‌متر از تنه درختان می‌باشد. قطره‌چکان از نوع یورودریپ^۲ با دبی ۸L/h با فاصله ۷۵ سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند. آبیاری‌ها بر اساس مدیریت باغدار هر هشت روز یک‌بار و به مدت شش

چن و همکاران، ۲۰۱۴)، با این وجود دقت مدل به میزان دقت پارامترهای وارد شده به مدل وابسته است (سلیم و همکاران، ۲۰۱۳). به طور مقتضی انتخاب و مقیاس بندی^۱ تابع تنش رطوبتی یکی از مهم‌ترین مسایل در مدل‌سازی جذب آب توسط گیاه (تعرق) و جریان آب در خاک می‌باشد. چراکه در بیشتر موارد گیاهان در رطوبت‌هایی بالاتر از یک مکش معین از تنش رطوبتی رنج می‌برند. در این شرایط ریشه گیاهان نمی‌توانند آب را با سرعتی که نیاز اتمسفری تقاضا می‌کند از خاک اطراف ریشه جذب کنند. وابستگی جذب آب ریشه به فراهمی آب خاک با استفاده از توابع تنش رطوبتی کمی سازی می‌گردد که دو مدل فدز و همکاران (۱۹۷۸) و ونگنوختن (۱۹۸۷) معتبرترین مدل‌ها می‌باشد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ فدز و راتز، ۲۰۰۴).

یانگ و همکاران (۲۰۱۳) با اندازه‌گیری تغییرات مداوم پتانسیل آب ساقه نشان دادند که تابع تغییرات تبخیر و تعرق نسبت به پتانسیل آب گیاه به صورت S شکل می‌باشد؛ با این وجود معادله S شکل ونگنوختن برازش نسبتاً ضعیفی به داده‌های مزرعه‌ای دارد و برخی از داده‌ها شدیداً از معادله برازشی فاصله دارند. این نشان می‌دهد که برخی عواملی به غیر از شرایط رطوبتی آب خاک بر جذب آب ریشه اثر دارند. ایده مشابهی در مطالعه فدز و همکاران (۱۹۷۸) نیز مشاهده می‌شود به این صورت که حتی با یکسان بودن شرایط رطوبتی خاک، گیاهان در روزی با تبخیر و تعرق پتانسیل بزرگتر تنش بیشتری نسبت به روزی با تبخیر و تعرق کوچکتر تحمل می‌کنند. این تنش رطوبتی اضافی به دلیل ناکافی بودن تامین آب نیست، بلکه به دلیل نیاز اتمسفری بالا می‌باشد. عواملی همانند کمبود فشار بخار، تابش خورشیدی و دمای هوا، برای محاسبه اثرات تنشی آنها در مدل‌هایی مانند هایدروس نادیده گرفته شده‌اند؛ بنابراین این امر امکان‌پذیر است که با اندازه‌گیری پاسخ گیاهی این عوامل را در جمله تبخیر و تعرق اعمال کرده و با تابع تنش رطوبتی ادغام کرد.

² Euro drip

¹ parameterizing

تقریباً 100 cm^3) تهیه گردید. بافت خاک به روش هایدرومتري، جرم مخصوص ظاهري و تخلخل با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده در سیلندر، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت و مشخصات نگهداری آب در خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشار اندازه‌گیری شد و مدل منحنی رطوبتی ونگنوختن (۱۹۸۰) به آن برازش داده شد (جدول ۱). همچنین در ضمن نمونه برداری مشخص شد که یک لایه با درصد بالای سنگریزه و مقاومت زیاد در عمق ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متری خاک وجود دارد که باعث عدم نفوذ ریشه به لایه‌های پایین‌تر شده توزیع ریشه را با محدودیت مواجه کرده است.

ساعت انجام گرفت. به منظور مطالعه چگونگی آبیاری زیرسطحی در ابتدای فصل رشد (اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۶) در سه ردیف از درختان به عنوان سه تکرار، خروجی آب قطره‌چکان‌ها به عمق ۳۵ سانتی‌متری انتقال داده شد.

نمونه‌برداری و آزمایشات

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک در ابتدای آزمایش پروفیلی حفر و تا عمق ۸۰ سانتی‌متری به فواصل ۲۰ سانتی‌متری نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده (در سیلندرهایی به حجم

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

عمق	بافت	BD (g/cm ³)	کربن آلی %	Ks (cm/day)	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n
۰-۲۰	لوم شنی	۱/۴۶	۲/۱	۱۵۴	۰/۰۶۵	۰/۴۷۲	۰/۰۲۷۵	۱/۴۲۴۴
۲۰-۴۰	لوم شنی	۱/۵۶	۰/۹۴	۱۰۳/۷	۰/۰۹	۰/۴۴۲	۰/۰۱۵۴	۱/۴۲۷۷
۴۰-۶۰	لوم شنی	۱/۶۵	۰/۵۸	۵۷/۷	۰/۰۷۶	۰/۴۱۶	۰/۰۲۲۴	۱/۳۹۱۴
۶۰-۸۰	شن لومی	۱/۶۶	۰/۴۸	۴۸	۰/۰۷۳	۰/۳۴	۰/۰۴۰۴	۱/۱۴۷۶

BD: جرم مخصوص ظاهري خاک، Ks هدایت هیدرولیکی اشباع

اندازه‌گیری رطوبت خاک

به منظور بررسی توزیع رطوبت در خاک در اطراف درخت در دو جهت لوله‌هایی از جنس PVC به قطر ۳۲ میلی‌متر با فواصل مختلف از درخت تا عمق ۶۰ سانتی‌متر (به دلیل مقاومت بالای خاک امکان جاگذاری بیشتر نبود) در خاک نسب گردید و در دوره آزمایش رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت سنج پروفیل پروب^۱ 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.

برای ارزیابی پاسخ گیاه به شرایط رطوبتی خاک از هر سامانه آبیاری سه درخت انتخاب و هدایت روزانه‌ای در آن‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین برای حذف اثرات محیطی بر پاسخ گیاه سه درخت دیگر به عنوان مرجع انتخاب شد که در آنها آبیاری‌ها در هر سه روز یکبار صورت گرفت تا از اعمال تنش آبی اجتناب گردد. هدایت روزانه‌ای 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.

مدلسازی توزیع رطوبت خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D

مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های شبیه‌سازی است که جریان آب و املاح را در یک یا دو و

اندازه‌گیری هدایت روزانه‌ای

¹ Moisture Meter Profile Probe, types PR2

h : پتانسیل آب در مکان مشخصی (x, z) از خاک [cm].
 h_{50} : پتانسیل آب خاک در حالتی که جذب آب توسط ریشه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد [cm] و p : پارامتر برازشی که عموماً ۳ در نظر گرفته می‌شود (ونگنوختن و گوپتا، ۱۹۹۳).

وقتی که سرعت جذب آب بالقوه به طور برابر در دو بُعد ناحیه ریشه توزیع گردد، S_p به حالت زیر در می‌آید:

$$S_p = \frac{1}{L_x L_z} S_t T_p \quad (5)$$

در اینجا T_p سرعت تعرق بالقوه، L_z عمق ناحیه ریشه، L_x طول ناحیه ریشه، و S_t عرض سطح خاک مرتبط با فرایند تعرق می‌باشد. معادله فوق می‌تواند از طریق وارد کردن توزیع غیریکنواخت سرعت بالقوه جذب آب در ناحیه ریشه به شکل زیر عمومی گردد:

$$S_p = B(r, z, h) S_t T_p \quad (6)$$

که $B(r, z, h)$ توزیع جذب آب نرمال شده است. این تابع تغییرات فضایی جمله استخراج بالقوه S_p را در ناحیه ریشه توصیف می‌کند:

$$B(r, z, h) = \frac{b(r, z, h)}{\int_{\Omega_R} b(r, z, h) d\Omega} \quad (7)$$

Ω_R نشان دهنده منطقه اشغال شده توسط ریشه و $b(r, z, h)$ تابع اختیاری بیان کننده چگونگی توزیع ریشه می‌باشد (سیمونک و همکاران، ۲۰۱۲). مدل پیشنهادی ورات^۲ و همکاران (۲۰۰۱) برای توزیع دو بعدی جذب آب ریشه به صورت معادله ۸ ارائه شده است:

$$b(r, z) = \left[\left(1 - \frac{z}{z_m} \right) \right] \left[\left(1 - \frac{r}{r_m} \right) \right] e^{-\left(\frac{P_z}{z_m} |z^* - z| + \frac{P_r}{r_m} |r^* - r| \right)} \quad (8)$$

$b(r, z)$ بیان کننده توزیع فضایی دوبعدی جذب آب ریشه به صورت بدون واحد^۳، z_m و r_m حداکثر عمق و طول شعاعی ریشه دوانی، P_z ، z^* ، P_r و r^* پارامترهای تجربی هستند. z و r عمق و فاصله شعاعی از مبدا گیاه (cm) می‌باشند. این پارامترها به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که مدل برای $z \geq z_m$ و همچنین $r \geq r_m$ جذب آب ریشه

یا سه بُعد در شرایط اشباع و غیراشباع شبیه‌سازی می‌کند. این مدل حرکت دو و سه بعدی آب در خاک را با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز شبیه‌سازی می‌کند. در این تحقیق از فرم دو بعدی آن استفاده شد که با فرض خاک همسان و یکنواخت، حرکت دوبعدی به صورت معادله ۱ ارائه می‌گردد:

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

در این رابطه:

θ : رطوبت حجمی (m^3/m^3) ، h : پتانسیل آب خاک (cm)، t : زمان (day)، S : عبارت منبع یا مصرف^۱ (day^{-1}) ، x و z : مختصات فضایی (cm)، و $k(h)$ تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع (cm/day) است که با رابطه زیر مشخص می‌گردد (فوگات و همکاران، ۲۰۱۲):

$$k(h) = k_s \cdot k_r(h) \quad (2)$$

در اینجا k_r هدایت هیدرولیکی نسبی و k_s هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد. اجرای نرم افزار هایدروس نیازمند تعریف پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشد که بدین منظور از روابط ونگنوختن - معلم استفاده گردید (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۵).

جمله منبع یا مصرف در معادله ۱، بیانگر حجم آب جذب شده در واحد زمان از واحد حجم خاک به دلیل جذب ریشه گیاه می‌باشد. فوس و همکاران (۱۹۷۸) S را به این صورت تعریف کرده‌اند:

$$S(h) = a(h) S_p \quad (3)$$

تابع $a(h)$ پاسخ گیاه به تنش آب که یک تابع بی بعد از مکش آب خاک $(0 \leq a \leq 1)$ است. S_p سرعت جذب آب بالقوه می‌باشد که برابر سرعت جذب آب در طول دوره عدم وجود تنش آبی است. تابع تنش آب توسط ونگنوختن (۱۹۸۷) به صورت زیر ارائه گردیده است:

$$a(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}} \right)^p} \quad (4)$$

¹ Sink term

² Vrugt
³ Dimensionless

درخت پسته در این مزرعه با توجه به مقادیر گزارش شده برای گیاهان مختلف (ورات و همکاران، ۲۰۰۱؛ گاردنز و همکاران، ۲۰۰۵؛ فوقات و همکاران، ۲۰۱۲؛ سلیم و همکاران، ۲۰۱۳) برای شرایط باغ مورد مطالعه تعیین و در جدول ۲ نشان داده شده است. گانگ^۲ و همکاران (۲۰۰۶) نیز برای درختان سیب نشان دادن که بیشترین جذب رطوبت از فاصله ۳۰ تا ۷۰ سانتی متری تنه درخت و از عمق ۴۰ تا ۸۰ سانتی متری صورت می‌گیرد.

را صفر در نظر می‌گیرد، جذب غیرمتقارن آب توسط ریشه را نیز اعمال کرده و امکان در نظر گرفتن عمق با حداکثر جذب آب ریشه را در هر عمقی بین ۰ تا Z_m ممکن می‌سازد. 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 (کومانوف^۱ و همکاران، ۱۹۹۷؛ ورات و همکاران، ۲۰۰۱) که برای SDI عمق ۳۵ سانتی متری و در DI عمق ۲۰ سانتی متری در نظر گرفته شد. مقادیر این پارامترها برای

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

P_r	r^*	r_m	P_z	Z^*	Z_m	سامانه آبیاری
۲/۹۱۸	۴۰	۲۰۰	۳,۲۱۴	۲۰	۷۰	DI
۲/۹۱۸	۴۰	۲۰۰	۳,۲۱۴	۳۵	۷۰	SDI

و همکاران (۱۳۹۱) نیز از این مقادیر ارائه شده، برای ضرایب گیاهی پسته برای منطقه اردکان استفاده کردند.

شرایط اولیه و مرزی

با توجه به اینکه در مدل لازم است که محدوده یک قطره‌چکان در نظر گرفته شود، 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. همان‌گونه در مطالعات قبلی توسط اسکگر و همکاران (۲۰۰۴) و هانسون و همکاران (۲۰۰۸) نشان داده شده بود، فرض منبع خطی بینهایت بهترین بیان از سامانه آبیاری قطره‌ای است، در اینجا نیز شبیه‌سازی آبیاری قطره‌ای با این فرض صورت گرفت. در طول دوره آبیاری مرز مربوط به خطوط قطره‌چکان جریان ثابتی دارد که میزان آن برابر با سرعت کاربرد آب در تمام سطح مقطع خط قطره‌چکان است؛ به عبارت دیگر شدت جریان در محل قطره‌چکان از تقسیم نرخ جریان

سرعت تعرق بالقوه با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$T_p = K_c E T_0 - E_s \quad (9)$$

K_c ضریب گیاهی؛ $E T_0$ تبخیر و تعرق مرجع (LT^{-1})؛ و E_s نشان دهنده تبخیر از سطح خاک (LT^{-1}) می‌باشد که طبق تحقیقات هانسون و همکاران (۲۰۰۸) و گاردنز و همکاران (۲۰۰۵) میزان تبخیر از سطح خاک برای SDI برابر صفر و در DI برابر با ۰/۵ تبخیر و تعرق کل می‌باشد. لذا در این تحقیق نیز این مقادیر استفاده شدند. برای محاسبه $E T_0$ از نرم‌افزار ET₀ Calculator Version 3.2 که در سایت فائو^۳ در دسترس عموم قرار دارد، استفاده شد. همچنین داده‌های اقلیمی مورد نیاز از سایت سازمان هواشناسی کشور^۴ برای دو ایستگاه شهریار و فرودگاه امام خمینی استخراج شده و در نهایت $E T_0$ برای تمام ماه‌های مختلف سال مورد مطالعه محاسبه گردید. ضریب گیاهی درختان پسته (K_c) در دوره‌های مختلف رشد توسط گلدمهر و همکاران (۱۹۹۵) ارائه شده که گورثرو و همکاران (۲۰۰۵) برای تعیین نیاز آبی درختان پسته در مرکز تحقیقاتی در اسپانیا^۵ از این جدول استفاده کردند. دستورانی

⁴ <http://www.irimo.ir/far/wd/2703>

⁵ El Chaparrillo Research Station, Ciudad Real, Spain

¹ Koumanov

² Gong

³ <http://www.fao.org/nr/water/eto.html>

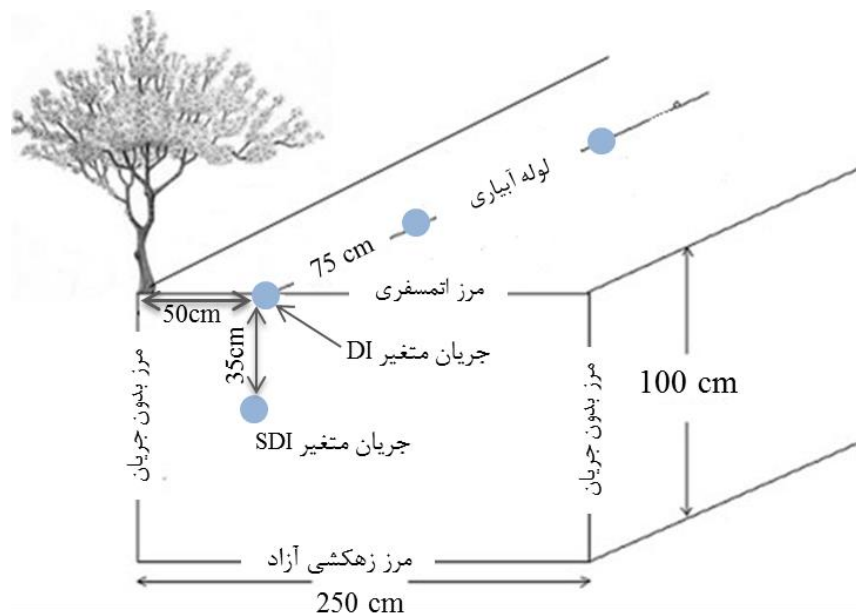
تعیین شرایط اولیه رطوبت خاک، مدل برای یک دوره ۹۶ روزه (از ابتدای فصل رشد تا شروع آزمایش) اجرا شد. در ابتدای فصل رشد به دلیل وجود بارندگی‌های مکرر زمستانه و بهاره شرایط اولیه رطوبت خاک یکنواخت و برابر با FC در نظر گرفته شد. مقادیر جریان ورودی آب در این دوره، طبق آبیاری‌های انجام شده در مزرعه مشابه با رابطه ۱۰ و ۱۱ محاسبه و وارد مدل شد. میزان بارندگی و تبخیر و تعرق نیز با استفاده از آمار اداره هواشناسی بدست آمد. سایر پارامترها از قبیل پارامترهای هیدرولیکی و جذب آب ریشه نیز طبق توضیحات وارد مدل شد و در نهایت نتیجه روز ۹۶ به عنوان شرایط اولیه رطوبت خاک در ابتدای اندازه‌گیری‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

خروجی بر سطح لوله در بین دو قطره‌چکان محاسبه می‌شود. لذا با توجه به تحقیقات انجام شده (اسگکز و همکاران، ۲۰۰۴؛ سلیم و همکاران، ۲۰۱۳) برای آبیاری زیرسطحی و سطحی به ترتیب به صورت روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه شد:

$$q_{SDI} = \frac{8 \times 1000 \times 24}{75 \times 2\pi \times 1} = 407.6 \frac{cm}{day} \quad (10)$$

$$q_{DI} = \frac{8 \times 1000 \times 24}{75 \times 10} = 256 \frac{cm}{day} \quad (11)$$

دبی قطره‌چکان ۸l/h، فاصله بین قطره‌چکان‌ها ۷۵cm و محیط اشباع شده در اطراف لوله در SDI برابر با محیط لوله (اسگکز و همکاران، ۲۰۰۴) و در DI برابر ۱۰cm می‌باشد (فوغات و همکاران، ۲۰۱۱؛ سلیم و همکاران، ۲۰۱۳). برای



شکل ۱- شرایط مرزی جریان برای مدل‌سازی توزیع رطوبت خاک

به مدت ۱۷ روز (متقارن با زمان اندازه‌گیری رطوبت خاک و هدایت روزنه‌ای) در هر دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی صورت گرفت. محدوده شبیه‌سازی شده برای مدل به عمق ۱۰۰ سانتی‌متر و عرض ۲/۵ متر (نصف فاصله بین ردیف درختان) برای درختان پسته در نظر گرفته شد. محدوده انتقال به ۱۰۱۸۲ و ۸۰۹۵ عناصر محدود به ترتیب در DI و SDI تفکیک گردید که شبکه‌بندی بسیار ریز در

شبیه‌سازی با استفاده از نسخه HYDRUS (2012) 2.04 انجام شد که دارای قابلیت‌های جدیدی می‌باشد. از جمله این قابلیت که در آبیاری سطحی برای مرز جریان ورودی در صورت اشباع شدن یک نقطه، جریان به نقطه کناری انتقال داده و از ایجاد شرایط فوق اشباع و ماندابی^۱ جلوگیری کند که از این طریق سطح خیس شده جریان را محاسبه می‌کند. شبیه‌سازی برای دو دور آبیاری

^۱ Ponded

نتایج

پاسخ گیاه به شرایط رطوبتی خاک

میانگین تغییرات هدایت روزنه‌ای (g_s) در سه تکرار و دو دور آبیاری برای دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و زیرسطحی (SDI) و همچنین درختان مرجع یا تیمار خوب آبیاری شده (A) در شکل ۲ آمده است. مشاهده می‌شود هدایت روزنه‌ای تیمار خوب آبیاری شده در همه زمان‌ها بیشتر از دوسامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی است. این بدلیل توزیع بیشتر رطوبت در خاک و فراهمی بیشتر آب و همچنین کاهش غلظت املاح خاک و افزایش جذب عناصر غذایی می‌باشد. در روز پنجم بعد از آبیاری کاهش یکباره هدایت روزنه‌ای در دو تیمار DI و SDI نسبت به درختان آبیاری شده با دور آبیاری سه روز (A) مشاهده می‌شود (شکل ۲). اصول طراحی آبیاری قطره‌ای بر مبنای دور کوتاه آبیاری و توزیع یکنواخت آب می‌باشد که در اغلب باغات بدلیل محدودیت منابع آب دور آبیاری مشابه آبیاری سطحی انجام شده و این سامانه فقط جهت توزیع یکنواخت آب استفاده می‌شود. لذا این مسله باعث می‌شود که از پتانسیل تولید در روش آبیاری قطره‌ای استفاده نشود.

نزدیکی قطره‌چکان (۰/۳ سانتی‌متر) بود و به تدریج با دور شدن از قطره‌چکان اندازه عناصر (تا ۴/۸ سانتی‌متر) افزایش یافت. به منظور واسنجی مدل هایدروس در محل‌های منطبق به اندازه‌گیری‌ها نقاط مشاهده‌ای^۱ انتخاب شده 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 ۱۲ تا ۱۵ مورد بررسی قرار گرفت.

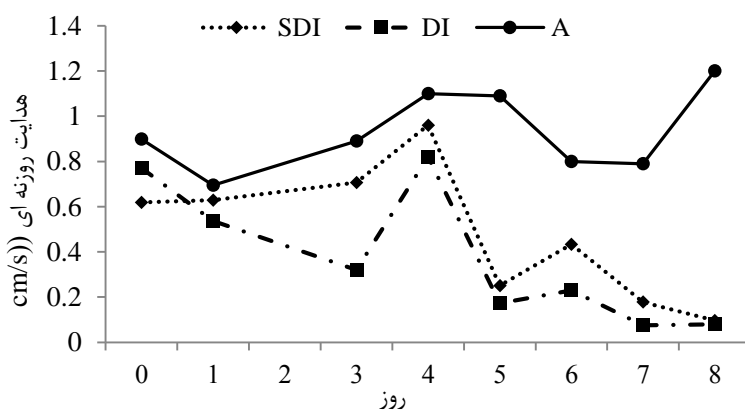
$$ME = \frac{\sum(O_i - P_i)}{n} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - P_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (15)$$

در این روابط O_i داده‌های مشاهده‌ای و P_i برآوردهای متناظر مدل می‌باشد.



شکل ۲- میانگین تغییرات هدایت روزنه‌ای نیمروز در روزهای پس از آبیاری

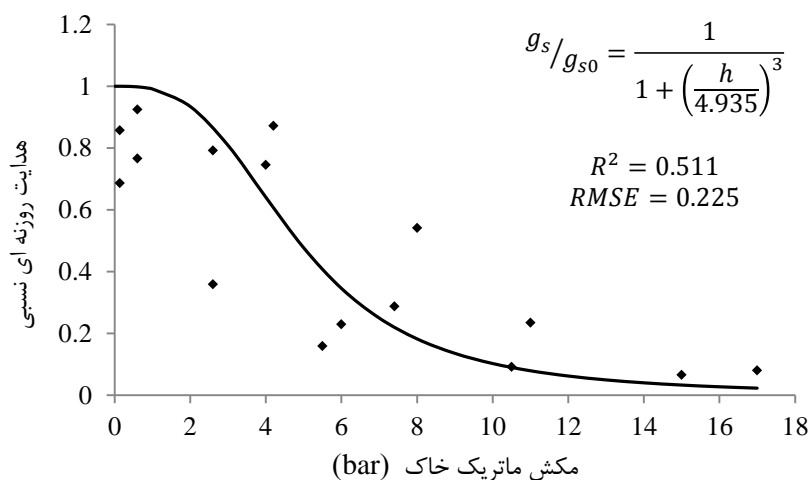
ترکیبی دمای برگ، شدت نور، غلظت دی اکسید کربن بین سلولی و کمبود فشار بخار اتمسفر و همچنین پتانسیل آب نسبت داده‌اند (کوان، ۱۹۷۷؛ توزات و همکاران، ۲۰۰۳).

شکل ۲ نشان می‌دهد که هدایت روزنه‌ای در روزهای مختلف دارای نوسانات شدیدی است که به دلیل شرایط محیطی می‌باشد. محققان این نوسانات را به اثرات

^۱ Observation nodes

برای نرمال کردن اثرات محیطی بر روی g_s ، هدایت روزنه-ای تیمارهای مختلف بر هدایت روزنه‌ای درخت خوب آبیاری شده تقسیم شد (g_s/g_{s0}) (چاهال، ۲۰۱۰). برای بدست آوردن تابع تنش رطوبتی درخت پسته، با استفاده از ابزار برازش منحنی^۱ نرم افزار متلب، مدل ونگنوختن (۱۹۸۷) (معادله ۴) به داده‌های نرمال شده هدایت روزنه‌ای

به صورت تابعی از میانگین مکش ماتریک خاک در دو سامانه آبیاری برازش داده شد. اندازه‌گیری‌ها برازش نسبتاً خوبی را به معادله نشان دادند و مکش h_{50} ۴۹۳۵ سانتی‌متر بدست آمد (شکل ۳).



شکل ۳- تغییرات هدایت روزنه‌ای نسبی درختان پسته به صورت تابعی از مکش ماتریک خاک

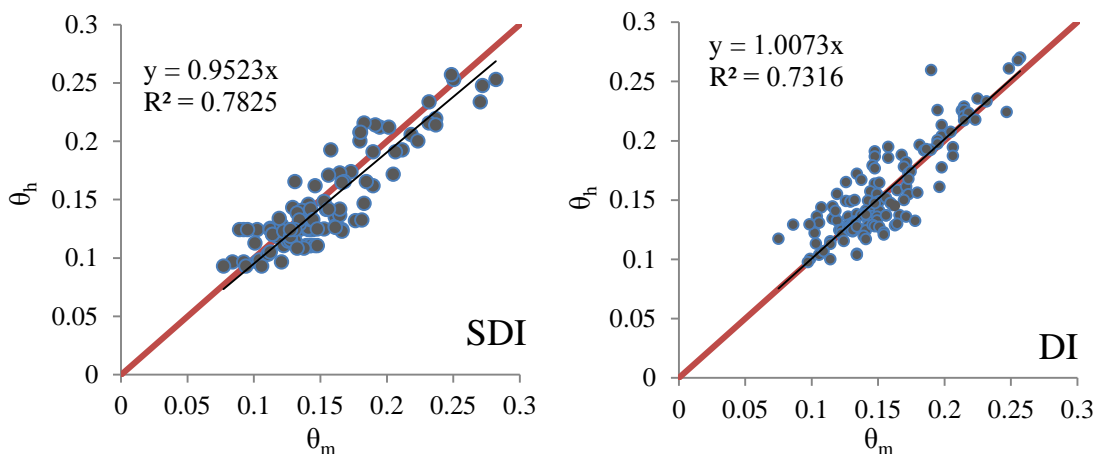
همانگونه که قبلاً نیز بیان شده است فاصله بین قطره‌چکان-ها در این مزرعه برابر ۷۵ سانتی‌متر است و این فاصله منطبق بر عرض خیس شده برای هر قطره‌چکان می‌باشد که در نتیجه با همپوشانی مناسب قطره‌چکان‌ها رطوبت مورد نیاز درختان می‌تواند به خوبی تامین گردد.

مقایسه نتایج حاصل از مدل هایدروس با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مزرعه در شکل ۴ نشان داده شده است. R^2 بالای نتایج نشان دهنده قدرت نرم افزار هایدروس دوبعدی در برآورد رطوبت خاک در بازه‌های مختلف زمانی می‌باشد. همچنین نزدیک بودن شیب خط ۱:۱ به یک نشان دهنده این است که مدل بیش برآورد یا کم برآورد چندانی ندارد.

مدلسازی با هایدروس

نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییرات رطوبت خاک در فاصله زمانی بین دو آبیاری نشان داد که هر قطره‌چکان فقط دامنه محدودی از کل وسعت در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با وجود تفاوت‌هایی در الگوی خیس شدگی، کل عرض خیس شده در هر دو سامانه آبیاری برابر بوده و ۹۴ سانتی‌متر بدست آمد. عرض دارای مکش بالای ۳۰۰ سانتی‌متر در زمان اتمام آبیاری، برای SDI و DI به ترتیب ۵۸ و ۶۱ سانتی‌متر بدست آمد که با گذشت یک روز به ۷۵ و ۸۰ سانتی‌متر گسترش یافت.

^۱ Curve fitting tool

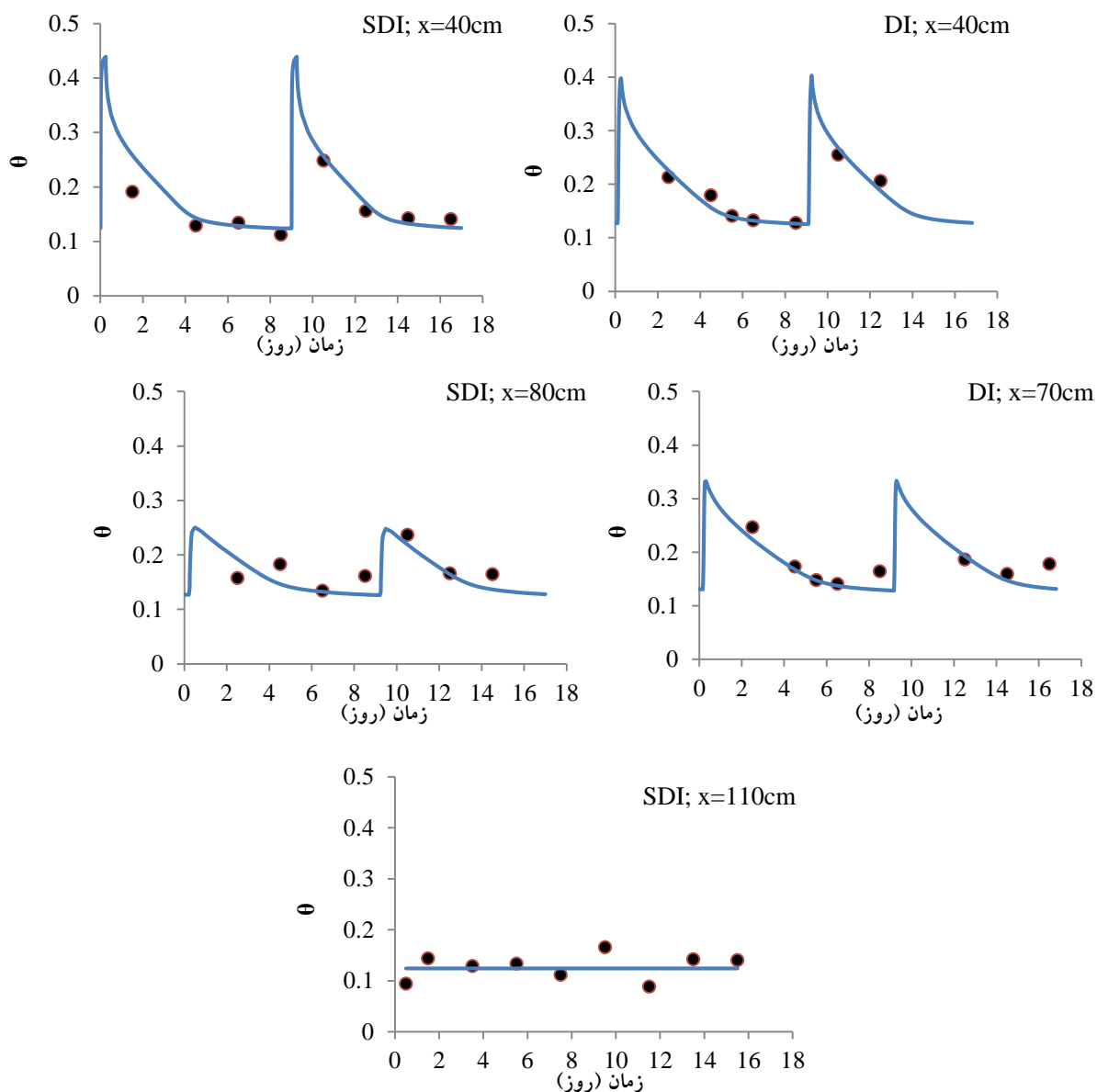


شکل ۴- مقادیر رطوبت حجمی (cm^3/cm^3) اندازه‌گیری (θ_m) و مدلسازی شده (θ_h) در همه زمان‌ها و نقاط

عوامل موثر بر اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و مدلسازی شده می‌تواند ناشی از خطاهای موجود در اندازه‌گیری رطوبت توسط دستگاه پروفیل پروب باشد که خود متأثر از چگونگی نسب لوله‌های رطوبت سنج، حضور عوامل ناشناخته (از جمله سنگ، ریشه و فضای خالی) در اطراف لوله‌های نسب شده و دقت خود دستگاه است. تغییرات فضایی شرایط رطوبتی خاک، تخریب ساختار خاک با نصب سنجنده‌های رطوبت سنج و حضور ارگانسیم‌های زنده، می‌تواند باعث ایجاد اختلاف گردد (فوجیماک^۱ و همکاران، ۲۰۰۸؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین فرض‌های موجود در مدل جذب آب ریشه از قبیل جذب متقارن آب توسط ریشه و وجود یک نقطه با حداکثر شدت جذب (ورات و همکاران ۲۰۰۱)، می‌تواند دلیل متفاوت بودن شدت جذب آب ریشه برآوردی با واقعیت شده و سبب ایجاد خطا شود.

روند تغییرات رطوبت خاک حاصل از مدل در عمق ۳۰ سانتی‌متری برای هر دو سامانه آبیاری در فواصل متفاوت نسبت به درخت در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۵ نشان داده شده است. در هر دو سامانه آبیاری رطوبت مدلسازی شده تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. در فواصل نزدیک به قطره‌چکان ($x=40$) در همه زمان‌ها و در هر دو سامانه آبیاری، مقادیر مدلسازی منطبق بر مقادیر اندازه‌گیری شده بود. با دور شدن از قطره‌چکان خطای مدل افزایش یافت و به ویژه برای زمان‌های طولانی‌تر، مدل دارای خطای بیشتری بود. براساس نتایج هایدروس در فاصله ۱۱۰ سانتی‌متری از درخت، میزان رطوبت خاک در طول زمان ثابت می‌باشد، چراکه خارج از محدوده جریان است، با این وجود مقادیر اندازه‌گیری شده دارای نوسان بوده و نشان می‌دهد که رطوبت خاک در این فاصله نیز از آبیاری تاثیر می‌پذیرد. این اختلاف می‌تواند به دلیل وجود جریان ترجیحی یا خطا در مدلسازی باشد. سایر

^۱ Fujimaki



شکل ۵- تغییرات رطوبت حجمی (θ cm^3/cm^3) اندازه‌گیری (*) و مدلسازی شده (—) در فواصل مختلف از درخت در عمق ۳۰ سانتیمتری

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

سامانه آبیاری	ME	RMSE	E	R ²
SDI	-۰/۰۰۶	-۰/۰۲۱	-۰/۷۶۱	-۰/۷۹۴
DI	-۰/۰۰۲	-۰/۰۲۰	-۰/۷۰۰	-۰/۷۴۱

بالاتری برخوردار است. اسکگر و همکاران (۲۰۰۴) نیز با به دست آوردن RMSE بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ برای مدلسازی هایدروس در شرایط مختلف جمع‌بندی کردند که نرم‌افزار HYDRUS-2D می‌تواند به عنوان یک ابزاری بسیار مناسب برای طراحی و پایش اقدامات مدیریتی آبیاری مورد

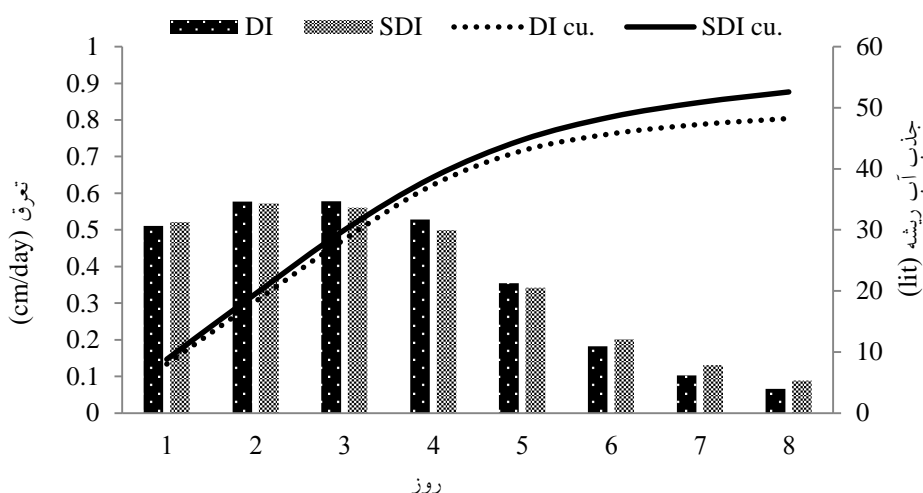
مقادیر آماره‌های صحت سنجی (جدول ۳) نیز نشان دهنده خطای مدل در حد cm^3/cm^3 ۰/۰۲ و م برآورد و بیش برآورد زیر ۰/۰۱ رطوبت حجمی می‌باشد. همچنین آماره E نشان می‌دهد که مدلسازی برای آبیاری زیرسطحی نسبت به آبیاری سطحی از صحت و دقت

تعرق روزانه گیاه و جذب آب تجمعی در یک دوره آبیاری در دو سامانه DI و SDI نشان داده شده است. مدل سازی نشان می دهد که در SDI آب بیشتری نسبت به DI صرف جذب گیاه می شود که از نظر آماری در سطح ۱٪ معنی دار می باشد (جدول ۴). این می تواند به دلیل نبود تبخیر سطحی و تطابق بهتر الگوی جذب آب ریشه با الگوی توزیع رطوبت باشد؛ به عبارت دیگر قرار گرفتن منبع آب در لایه زیرسطحی ضمن اینکه باعث کاهش تبخیر از سطح خاک می شود، حجم بیشتری از خاک را که مرتبط با جذب آب ریشه است، مرطوب می کند.

استفاده قرار گیرد. فوگات و همکاران (۲۰۱۲)، ابولایلا و همکاران (۲۰۱۲) و سلیم و همکاران (۲۰۱۳) نیز دقت بالای HYDRUS-2D در مدل سازی تغییرات رطوبت خاک بیان کرده اند. در این تحقیق نیز ثابت شد که با کاربرد هایدروس برای شرایط واقعی باغ تحت مدیریت باغدار می تواند توزیع رطوبت خاک و جذب آب ریشه را با دقت و صحت بالایی برآورد نماید.

ارزیابی مدل با پاسخ گیاه

در سامانه آبیاری قطره ای مهمترین عامل مصرف آب تعرق گیاهی است. در شکل ۶ خروجی هایدروس برای



شکل ۶- تعرق روزانه (نمودار ستونی) و آب جذب شده توسط ریشه (نمودار خطی) محاسبه شده با هایدروس برای آبیاری قطره ای سطحی و زیرسطحی

جدول ۴- جدول تجزیه واریانس هدایت روزنه ای و جذب آب ریشه در روزهای مختلف در دو سامانه آبیاری DI و SDI

جذب آب ریشه		هدایت روزنه ای		
میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۱۲/۴۸۸**	۱۶	۰/۴۳۳**	۱۱	روز
۱۸۵۷**	۱	۰/۲۰۹**	۱	سامانه آبیاری

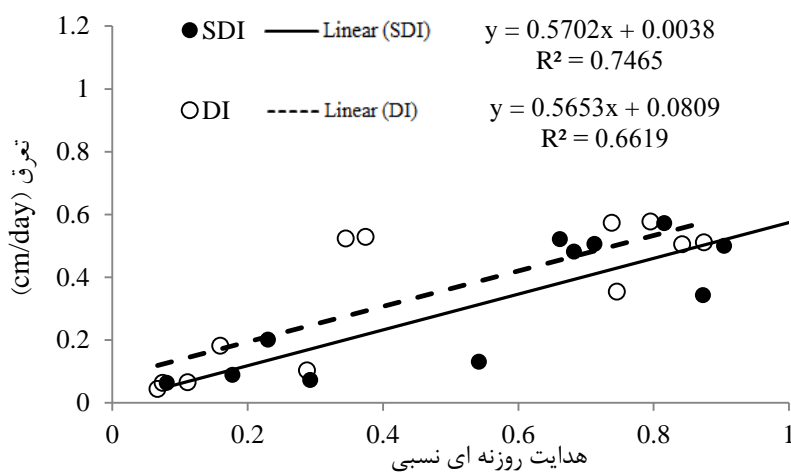
پاسخ های گیاهی به کاهش رطوبت خاک و در نتیجه تنش خشکی، بسته شدن روزنه ها و کاهش تعرق می باشد (اسماعیل پور و همکاران، ۲۰۱۵؛ فلکس و همکاران، ۲۰۰۲). اسماعیل پور و همکاران (۲۰۱۵) مشاهده کردند که تنش خشکی به طور معنی داری باعث کاهش میزان فتوسنتز

مدل سازی نشان داد که بعد از روز چهارم رطوبت خاک در هر دو سامانه آبیاری قطره ای سطحی و زیرسطحی پاسخگوی نیاز گیاهی نبوده و تعرق کاهش یافته است. برای بررسی صحت این یافته می توان به پاسخ گیاهی استناد کرد. نتایج تحقیقات انجام شده نشان داده است که یکی از اولین

زیرسطحی، می‌تواند با تغییر فراهمی آب، محدودیت جذب آب را کاهش دهد.

شکل ۷ نشان می‌دهد که رابطه مستقیم و معنی داری بین تعرق بدست آمده از مدل هایدروس با هدایت روزنه‌ای نسبی وجود دارد. مقایسه نتایج شکل ۷ با جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل هایدروس در برآورد رطوبت خاک دقت بالاتری نسبت به تعرق دارد که می‌تواند به دلیل تغییرات بالای تعرق در اثر شرایط محیطی باشد.

و هدایت روزنه‌ای در درختان پسته می‌گردد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (جدول ۴). نتایج ارائه شده در شکل ۲ نیز نشان می‌دهد که تغییرات هدایت روزنه‌ای در هر دو سامانه بعد از روز چهارم کاهش چشم‌گیری داشته است. همانطوری که قبلاً نیز اشاره گردید باغداران دور مناسب آبیاری را رعایت نمی‌کنند و در واقع از روش آبیاری قطره-ای با دور آبیاری سطحی استفاده می‌کنند. لذا این مسئله باعث می‌شود که در روزهای آخر جذب آب با محدودیت مواجه شود. تغییر سامانه آبیاری از قطره‌ای سطحی به



شکل ۷- رابطه بین هدایت روزنه‌ای نسبی با تعرق بدست آمده از مدل هایدروس

نداشتن خطای جهت دار (بیش برآورد یا کم‌برآورد $ME < 0.01$) میزان رطوبت خاک را با خطای اندک ($0.2/0$) $RMSE =$ برای هر دو سامانه آبیاری برآورد می‌کند. این نتایج اثبات کرد که صفات هیدرولیکی خاک که قبل از شروع آبیاری تعیین شده است، معرف خوبی از خاک در طی دوره‌های آبیاری بوده و شبیه‌سازی صورت گرفته با استناد به این خصوصیات می‌تواند با دقت مناسبی شرایط رطوبتی خاک در هر زمان از فصل رشد پیش‌بینی نماید. اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای به عنوان یکی از مهمترین پاسخ‌های گیاهی به شرایط رطوبتی خاک، نیز نتایج به دست آمده از مدل هایدروس را تائید کرد. همبستگی بالای تعرق محاسبه شده با هدایت روزنه‌ای به ویژه در SDI نشان دهنده دقت مدل‌سازی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق توزیع رطوبت خاک در دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی اندازه‌گیری و با استفاده از مدل هایدروس نیز شبیه‌سازی گردید. پارامترهای مورد نیاز برای مدل با استفاده از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی تعیین گردید. همچنین از هدایت روزنه‌ای اندازه‌گیری شده در نیم‌روز برای تعیین پارامترهای تابع تنش رطوبتی و همچنین ارزیابی صحت مدل استفاده شد. بر این اساس مکش معادل کاهش ۵۰ درصد جذب آب ریشه (h_{50}) برابر ۴۹۳۵ سانتی‌متر بدست آمد که نشان می‌دهد پسته گیاهی مقاوم در برابر خشکی می‌باشد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که مدل مذکور می‌تواند با صحت بالایی، پویایی آب خاک را در شرایط وجود گیاه توصیف کند. مقادیر آماره‌های صحت سنجی نشان داد که مدل ضمن

با مقایسه دو سامانه آبیاری مشخص شد که فراهمی آب خاک برای گیاه در SDI به دلیل کمتر بودن تبخیر از سطح خاک و تناسب بهتر الگوی توزیع رطوبت با جذب آب ریشه، بیشتر از DI بوده و شرایط رطوبتی نسبتاً بهتری را برای گیاه فراهم می‌سازد. برآورد تعرق درخت پسته در شرایط مزرعه مشخص کرد که رطوبت خاک تا روز چهارم به خوبی پاسخگوی نیاز گیاهی بوده و با کوتاه‌تر کردن دور آبیاری می‌توان از تنش رطوبتی گیاه جلوگیری کرد.

فهرست منابع

۱. دستورانی، م.ت.، پورمحمدی، س. و رحیمیان، م.ح. ۱۳۹۱. تخمین تبخیر-تعرق واقعی باغات پسته منطقه اردکان به کمک سنجش از دور. پژوهش آب در کشاورزی. جلد ۲۶. شماره ۱. صفحات ۱-۱۲.
۲. خلیلی، م.، اکبری، م.، هزارجریبی، ا.، ذاکری نیا، م.، عباسی، ف. و کولانیان، ع. ۱۳۹۵. مدل کردن نیمرخ رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از HYDRUS-2D. آبیاری و زهکشی ایران. جلد ۱۰. شماره ۲. صفحات ۱-۱۱.
3. AbouLila, T.S., Berndtsson, R., Persson, M., Somaida, M., El-Kiki, M., Hamed, Y. & Mirdan, A. 2012. Numerical evaluation of subsurface trickle irrigation with brackish water. *Irrigation Science*, 31, 1125-1137.
4. Ayars, J., Phene, C., Hutmacher, R., Davis, K., Schoneman, R., Vail, S., & Mead, R. 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agricultural Water Management*, 42, 1-27.
5. Batchelor, C., Lovell, C., & Murata, M. 1996. Simple microirrigation techniques for improving irrigation efficiency on vegetable gardens. *Agricultural Water Management*, 32, 37-48.
6. 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. Adelaide, South Australia, Australia.
7. Chen, L.-J., Feng, Q., Li, F.-R., & 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.
8. Cowan, I.R. 1977. Stomatal behaviour and environment. *Advances in Botanical Research*, 4, 117-228.
9. Esmaeilpour, A., Van Labeke, M.-C., Samson, R., & Van Damme, P. 2015. Osmotic stress affects physiological responses and growth characteristics of three pistachio cultivars. *Acta physiologiae plantarum*, 37, 123-137.
10. Feddes, R. A., Kowalik, P. J., & Zaradny, H. 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. John Wiley & Sons. New York, NY.
11. Feddes, R.A., & Raats, PAC. 2004. Parameterizing the soil-water-plant root system. P. 95-141. In Feddes, R.A., de Rooij, GH., van Dam JC. (eds). *Unsaturated zone Modeling: Progress, Challenges, Applications*. Vol. 6. Wageningen UR Frontis Series. Springer: New York;
12. Flexas, J., Bota, J., Escalona, J.M., Sampol, B., & Medrano, H. 2002. Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations. *Funct Plant Biol*, 29, 461-471.
13. Fujimaki, H., Ando, Y., Cui, T.B., & Inoue, M. 2008. Parameter estimation of a root water uptake model under salinity stress. *Vadose Zone Journal*, 7, 31-38.
14. Gärdenäs, A., Hopmans, J., Hanson, B., & Šimůnek, J. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, 74, 219-242.

15. Gong, D., Kang, S., Zhang, L., Du, T., & Yao, L. 2006. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements. *Agricultural Water Management*, 83, 119-129.
16. Goldhamer, D. 1995. Irrigation management. *Pistachio Production*, 71-81.
17. Guerrero, J., Moriana, A., Pérez-López, D., Couceiro, J., Olmedilla N., & Gijón, M. 2005. Regulated deficit irrigation and the recovery of water relations in pistachio trees. *Tree physiology*, 26, 87-92.
18. Hanson, B., Hopmans, J.W., & Šimunek, J. 2008. Leaching with subsurface drip irrigation under saline, shallow groundwater conditions. *Vadose Zone Journal*, 7, 810-818.
19. Iniesta, F., Testi, L., Goldhamer, D.A., & Fereres, E. 2008. Quantifying reductions in consumptive water use under regulated deficit irrigation in pistachio (*Pistacia vera* L.). *Agricultural Water Management*, 95, 877-886.
20. Kandelous, M., & Simunek, J. 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28, 435-444.
21. Karlberg, L., & F.W.P. deVries. 2004. Exploring potentials and constraints of low-cost drip irrigation with saline water in sub-Saharan Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 1035-1042.
22. Koumanov, K.S., Hopmans, J.W., Schwankl, L.J., Andreu, L., & Tuli, A. 1997. Application efficiency of micro-sprinkler irrigation of almond trees. *Agric. Water Manage*, 34, 247-263.
23. Mmolawa, K., & Or, D. 2003. Experimental and numerical evaluation of analytical volume balance model for soil water dynamics under drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1657-1671.
24. 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.
25. Phogat, V., Mahadevan, M., Skewes, M., & 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.
26. Roberts, T., Lazarovitch, N., Warrick, A., & Thompson, T. 2009. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 233-240.
27. Selim, T., Berndtsson, R., & Persson, M. 2013. Simulation of Soil Water and Salinity Distribution under Surface Drip Irrigation. *Irrigation and Drainage*, 62, 352-362.
28. Šimunek, J., Van Genuchten, M.T., & 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.
29. Skaggs, T., Trout, T., Šimunek, J., & Shouse. P. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130, 304-310.
30. Subbaiah, R. 2013. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31, 225-258.
31. Tuzet, A., Perrier, A., & Leuning, R. 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell and Environment*, 26(7), 1097-1116.
32. 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.
33. van Genuchten, M.Th., & Gupta, S.K. 1993. A reassessment of the crop tolerance reponse function. *Indian Soc. Soil Sci*, 4, 730-737.
34. Vrugt J. A., Hopmans, J. W., & Simunek, J. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1027-1037.
35. Yang, Y., Guan, H., Hutson, J.L., Wang, H., Ewenz, C., Shang, S., & 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.