

شبیه‌سازی توزیع دوبعدی رطوبت خاک طی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

فاطمه نایب‌لویی^۱، مهدی کوچک‌زاده^{۲*}، کیومرث ابراهیمی^۳، مهدی همایی^۴، فریبرز عباسی^۵

۱. دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۴. استاد گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس

۵. استاد مرکز تحقیقات فنی مهندسی وزارت جهاد کشاورزی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۵/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۰/۱۶)

چکیده

آگاهی از مقدار و توزیع رطوبت در آبیاری زیرسطحی در مدیریت آب مزرعه اهمیت فراوان دارد. هدف این پژوهش شبیه‌سازی توزیع پساب در خاک با در نظر گرفتن اثر جذب ریشه و تبخیر از سطح خاک، تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، بود. بدین منظور، مزرعه‌ای آزمایشی انتخاب و کاهو در آن کاشته شد تا داده‌های مورد نیاز از آن جمع‌آوری شود. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های واقعی پتانسیل ماتریک و رطوبت حجمی خاک تعیین شد. پتانسیل ماتریک خاک در دامنه تانسیمیتری به کمک تانسیموتر و رطوبت خاک، به وسیله دستگاه TDR، به دست آمد. برای شبیه‌سازی از مدل HYDRUS-2D استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی مکانی نشان داد این مدل در نقاط دورتر از قطره‌چکان‌ها و با عمق بیشتر ($RMSE=0.03$) در مقایسه با نقاط نزدیک به قطره‌چکان و عمق کمتر ($RMSE=0.008$) نتایج بهتری ارائه می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی زمانی نیز نشان داد مدل چهل و هشت ساعت پس از آبیاری ($RMSE=0.005$) دقیق‌تر از یک ساعت پس از آبیاری عمل می‌کند ($RMSE=0.029$). بدین ترتیب، می‌توان دریافت، هنگامی که فرایندهای جذب آب به وسیله ریشه و تبخیر فعال است، مدل توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت آبیاری زیرسطحی دارد.

کلیدواژگان: آبیاری زیرسطحی، پساب، شبیه‌سازی، HYDRUS.

مقدمه

مطالعه حرکت آب در خاک و چگونگی جذب آن به وسیله ریشه گیاه در مصرف بهینه آب در بخش کشاورزی اهمیت فراوان دارد. یکی از ابزارهای مطالعه مصرف آب در مزرعه مدل‌های شبیه‌ساز است. پژوهشگران برای جذب آب و املاح مدل‌هایی ارائه کرده‌اند. از آن میان، فقط برخی از مدل‌های شبیه‌ساز آب در خاک پدیده جذب آب را به وسیله ریشه‌ها لحاظ می‌کنند. یکی از آن‌ها مدل HYDRUS (Simunek *et al.*, 1999) است. بیشتر مدل‌ها برای حالت یک‌بعدی تدوین شده‌اند و نمی‌توانند توزیع رطوبت را مطابق الگوی جذب ریشه به صورت شعاعی و عمودی در نظر گیرند. یکی از مدل‌هایی که به کمک آن می‌توان توزیع دو و سه بعدی جذب ریشه را لحاظ کرد مدل دو و سه بعدی HYDRUS است. این مدل دوبعدی را برای شبیه‌سازی توزیع آب و املاح در آبیاری‌های سطحی با دقتی

مناسب به کار بردند (Abbasi *et al.*, 2003b; a and 2003b; Kandelous and Simunek, 2010a and 2010b). توزیع رطوبت در خاک، به‌ویژه در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، به عواملی مانند ساختمان و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بستگی دارد (Singh *et al.*, 2006). مطالعات اولیه نشان داد عمق لترال به صورت مشخص توزیع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در تعیین عمق مناسب نصب لترال باید به ساختمان خاک، بافت خاک و الگوی توزیع ریشه توجه کرد (Patel Li and Liu, 2011; and Rajput, 2007). الگوی توزیع رطوبت در آبیاری زیرسطحی نیز بر پایه داده‌های آزمایشگاهی به کمک این مدل با موفقیت شبیه‌سازی شد (Provenzano, 2007).

Besharat *et al.* (2012) دو مدل HYDRUS و SWMRUM^۱ را بر پایه اندازه‌گیری‌های صحرائی رطوبت تا عمق ۱ متری خاک در یک باغ سیب مقایسه کردند و حداکثر و

قطره‌چکان زیرسطحی دارد، به گونه‌ای که مقدار آماره RMSE در مکان‌های مختلف نسبت به قطره‌چکان بین ۰/۱۱ تا ۰/۴۵ متغیر بود، و ثانیاً دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت در عمق‌های بیشتر کارگذاری بالاتر بود. هرچند پژوهش‌هایی در زمینه شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک در آبیاری زیرسطحی به کمک مدل HYDRUS-2D انجام شده، در اغلب آن‌ها به پدیده جذب آب ریشه‌ها و تبخیر از خاک سطحی توجه نشده است. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک طی دوره رشد کاهو در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از پساب انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای دستیابی به داده‌های مورد نیاز، در مزرعه‌ای به مساحت ۲۰۰ متر مربع در محل تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب شرق تهران (ارتفاع متوسط ۱۰۲۰ متر از سطح دریای آزاد) در اواخر تابستان ۱۳۹۱ (۱۳۹۱/۰۶/۲۴) کاهو کاشته شد. میانگین بارندگی سالیانه محدوده مطالعه شده ۲۴۴ میلی‌متر، میانگین دمای سالیانه ۲۳ درجه سانتی‌گراد و میانگین تبخیر سالیانه از تشت تبخیر ۲۵۹۱ میلی‌متر در سال است. دوره رشد کاهو هفتاد و پنج روز بود. منبع آب مورد استفاده پساب شهری با تصفیه ثانویه بود. برخی ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیک پساب استفاده شده برای آبیاری زیرسطحی در جدول ۱ می‌آید.

حداقل جذب آب را به وسیله ریشه‌های درخت سیب به دست آوردند. Wang *et al.* (2013) با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای در یک خاک لوم‌سیلتی تحت کشت گندم با سیستم آبیاری زیرسطحی با عمق ۲۵ سانتی‌متر در چهار عمق مختلف و طی ۱۱۸۰ ساعت از شروع کشت و در شش نوبت آبیاری انتقال رطوبت و دما را به کمک مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند مدل برای شبیه‌سازی این دو پارامتر در شرایط پژوهش دقت کافی را دارد و بر پایه آن سناریوهایی را تحت شرایط خاک ناهمگن، آبیاری‌های متوالی و نیاز تبخیری بالا هنگام توزیع ثابت ریشه طی ۴۹ روز شبیه‌سازی کردند. Provenzano (2007) و Skaggs *et al.* (2004) نیز از مدل HYDRUS-2D برای تحلیل آزمایش‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک لومی‌شنی دست‌خورده با عمق کارگذاری ۶ و ۱۰ سانتی‌متری استفاده کردند. آن‌ها دریافتند مدل HYDRUS-2D توانایی خوبی در شبیه‌سازی رطوبت قطره‌چکان زیرسطحی دارد. Kandelous and Simunek (2020b) نیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای در عمق‌های مختلف خاک لوم‌رسی دست‌نخورده مدل HYDRUS-2D را در شبیه‌سازی رطوبت ارزیابی کردند. عمق نصب قطره‌چکان زیرسطحی در مدل آزمایشگاهی آنان ۳۰ سانتی‌متر و در مزرعه ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر بود. نتایج پژوهش آنان نشان داد اولاً مدل HYDRUS-2D توانایی خوبی در شبیه‌سازی رطوبت

جدول ۱. برخی ویژگی‌های پساب استفاده شده در آبیاری طی دوره کشت

BOD ² (mg/l)	COD ¹ (mg/l)	TSS (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	نیترژن کل (mg/l)	اسیدیته	کلر آزاد (mg/l)
۱۲	۴۰/۹	۲۵/۱	۱۱/۲	۴/۸	۱۷/۴	۷/۶	۰/۶

1. Chemical Oxygen Demand

2. Biological Oxygen Demand

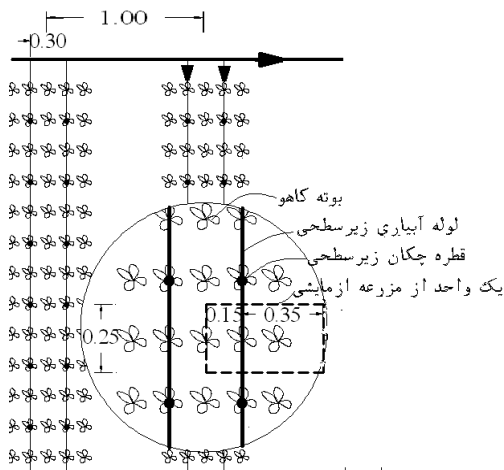
لوله قطره‌چکان‌دار استفاده شده ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. پیش از کشت، خاک سطحی تا عمق ۵۰ سانتی‌متری به وسیله کولتیواتور در چند مرحله کاملاً برگردان شد تا از یکنواختی خاک مزرعه اطمینان حاصل شود.

طی فصل رشد در پانزده نوبت آبیاری، پیش و پس از آبیاری در فواصل زمانی نیم‌ساعت تا ۷۲ ساعت پس از آبیاری، مقادیر پتانسیل ماتریک خاک اندازه‌گیری شد. مدت آبیاری با توجه به دبی متغیر ورودی به سیستم، نیاز آبی طی فصل رشد و پتانسیل ماتریک خاک بین ۱ تا ۲ ساعت بود؛ به گونه‌ای که حجم آب مورد نیاز گیاه طی دوره رشد تأمین شود. طی فصل زراعی، چهار نوبت بارندگی صورت گرفت که مقادیر ارتفاع

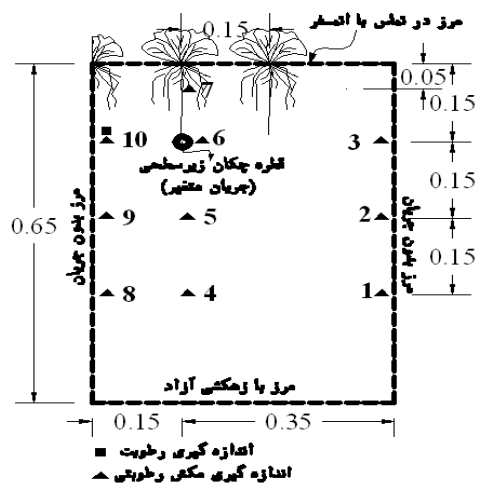
بر پایه توصیه Thompson and Doerge (1995)، خاک مزرعه پیش از کشت در چندین مرحله غرقاب شد تا از یکنواخت شدن رطوبت در خاک سطحی مزرعه اطمینان حاصل شود. لوله‌های آبیاری زیرسطحی ۱۶ میلی‌متری با فاصله قطره‌چکان ۵۰ سانتی‌متری و فاصله خطوط ۳۰ سانتی‌متری در خاک نصب شد. قطره‌چکان‌ها از نوع تنظیم‌کننده فشار بین ۰/۵ تا ۴ اتمسفر با دبی اسمی ۴ لیتر در ساعت انتخاب شدند. فیلتر دیسکی ۱۰۰ میکرونی قبل از ورودی سیستم نصب شد. در آبیاری زیرسطحی کاهو بیشترین بخش ریشه تا عمق ۱۵ سانتی‌متری آن تجمع می‌یابد (Thompson and Doerge, 1995). به همین دلیل، عمق نصب

همچنین، تبخیر و تعرق با استفاده از تشت تبخیر در محل مزرعه به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. ضریب تشت تبخیر، با توجه به میانگین سرعت باد و رطوبت نسبی و پوشش گیاهی اطراف، ۰/۶ به دست آمد (Brouwer and Heibloem, 1986). مقادیر تبخیر و تعرق به کمک مدل ریتچی (Ritchie, 1972)، با توجه به شاخص سطح برگ طی دوره رشد، از یک‌دیگر تفکیک و به مثابه ورودی‌های مدل استفاده شد. نمونه‌ای از تفکیک صورت‌گرفته برای دو دوره رشد اولیه و میانی در جدول ۳ می‌آید. جذب آب توسط گیاه به کمک مدل Arkin and Taylor (1981) به دست آمد. پارامترهای مدل Arkin and Taylor (1981) برای کاهو از پایگاه داده‌ای مدل HYDRUS-2D استخراج شد. برای لحاظ‌کردن جذب آب به وسیله ریشه‌های گیاه موقعیت بوته‌های کاهو برابر آنچه در مزرعه کشت شد (شکل ۱ ب) در هندسه مدل تعریف شد.

بارش ثبت و در شبیه‌سازی لحاظ شد. طی فصل کشت، مقدار پتانسیل ماتریک خاک با استفاده از ده عدد تانسئومتر نصب‌شده در فاصله‌های مختلف از قطره‌چکان‌های زیرسطحی و رطوبت حجمی به وسیله دستگاه TDR مدل TRIM-FM-IMKO-3 در یک نقطه ثبت شد. نمای کلی موقعیت تانسئومترها و سنسور TDR در شکل ۱ می‌آید. در ابتدای فصل زراعی، بافت خاک به روش هیدرومتری، نفوذپذیری خاک سطحی به روش استوانه‌های مضاعف، جرم ویژه ظاهری خاک به روش سیلندر و پتانسیل ماتریک در مکش ۱۵ اتمسفر به روش صفحات فشاری به دست آمد. خاک سطحی تا عمق ۴۵ سانتی‌متری بافت لومرسی داشت و با جرم ویژه ظاهری ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. برخی دیگر از ویژگی‌های فیزیکی خاک در جدول ۲ می‌آید.



ب) نمای بالا



الف) نیم‌برخ خاک

شکل ۱. نمای کلی موقعیت برداشت داده‌های پتانسیل ماتریک و موقعیت برداشت داده‌های رطوبت به وسیله دستگاه TDR (نقطه شماره ۱۰)

جدول ۲. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی

عمق خاک (cm)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	جرم ویژه ظاهری (gr/cm ³)	رطوبت حجمی در مکش ۱۵ اتمسفر (%)
۰-۴۵	۲۰	۵۳	۲۷	۱/۵	۱۱/۴

جدول ۳. نمونه‌ای از تفکیک تعرق از تبخیر به روش ریتچی در دو دوره رشد اولیه و میانی

تاریخ	ضریب گیاهی	شاخص سطح برگ	تبخیر تعرق پتانسیل به روش تشت تبخیر (mm/day)	تبخیر تعرق کاهو (mm/day)	تعرق (mm/day)
۱۳۹۲/۰۷/۱۲	۰/۴۵	۰/۱	۳/۴۲	۱/۵۴	۰/۰۱
۱۳۹۱/۰۸/۲۰	۱/۰۰	۱/۶۴	۲/۰۰	۲/۰۰	۱/۳۷

شبیه‌سازی

Z_m و r_m حداکثر توسعه ریشه در جهات عرضی و عمودی [L] و p_z و z^* و r^* پارامترهای تجربی‌اند که هندسه غیر متقارن ریشه را توصیف می‌کنند. چنانچه توزیع ریشه یکنواخت باشد، مقدار RDF برابر $1/(W \cdot Z_m)$ در نظر گرفته می‌شود (Gardenas et al., 2005). روابط ۱ تا ۴ در مدل‌سازی توزیع رطوبت و لحاظ‌کردن جذب آب به وسیله گیاه در مدل HYDRUS-2D استفاده شد.

هندسه جریان

در این پژوهش، پس از انتخاب یک واحد از مزرعه، به منزله نقطه معرف مزرعه آزمایشی، نیم‌رخ خاک به صورت شکل ۱ به مدل معرفی شد. محدوده مدل‌سازی مکعبی به طول و عرض ۵۰ و ارتفاع ۶۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که به منظور تبدیل این محدوده سه‌بعدی به محدوده‌های دوبعدی رطوبت در جهت عرضی (عمود بر صفحه شکل ۱ الف) یکنواخت فرض شد و بر این اساس نوع هندسه جریان، با توجه به قابلیت‌های مدل HYDRUS-2D، به صورت عمودی تعریف شد.

شرایط اولیه و مرزی

در این پژوهش فرض شد جریانی از اطراف وجود ندارد. بنابراین، مرزهای جانبی با شرایط مرزی بدون جریان^۲، مرز انتهایی به صورت زهکشی آزاد^۳، مرز بالادست که تبخیر و تعرق از آن صورت می‌گیرد به صورت مرز اتمسفری^۴، و محل قطره‌چکان در عمق ۱۵ سانتی‌متری سطح خاک به منزله شدت جریان متغیر^۵ تعریف شد. شرایط اولیه تعریف‌شده به مدل با توجه به توزیع رطوبت پیش از آغاز زمان شبیه‌سازی به مدل معرفی شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

پس از تعریف هندسه مدل و شرایط مرزی و شرایط اولیه، مدل بر پایه داده‌های مکش در چهار نقطه (نقاط شماره ۱۰، ۶، ۵ و ۴ شکل ۱ الف) و در طول زمان ۱۷۲٫۷۴ ساعت پس از شروع شبیه‌سازی (شروع از تاریخ ۱۳۹۱/۰۷/۲۴ یک ماه پس از کشت تا تاریخ ۱۳۹۱/۸/۴) واسنجی شد. برای واسنجی مدل، از داده‌های رطوبتی TDR متناظر با داده‌های تانسیموترها در نقطه ۱۰ نیز استفاده شد. در این مرحله، پارامترهای فیزیکی خاک شامل رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، مکش متناظر با نقطه ورود هوا به خاک (α)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، و پارامتر تجربی پیوستگی خلل‌و فرج خاک (l)، در مدل وان گنوختن- معلم به روش حل معکوس برآورد شد.

مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های حرکت آب و املاح و گرما در خاک است که می‌تواند معادله ریچاردز را برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال- انتشار را به منظور بررسی حرکت املاح و گرما در خاک به صورت عددی حل کند. معادلات یادشده با روش عددی عناصر محدود گالرکین حل شده‌اند (Simunek et al., 1999). این مدل قادر به شبیه‌سازی در شرایط اشباع و غیر اشباع است و توانایی تخمین ویژگی‌های فیزیکی خاک به روش معکوس را نیز دارد. با فرض همگن بودن خاک، مقدار نفوذ و پیش‌روی آب در مدل HYDRUS-2D به کمک رابطه ریچاردز برآورد می‌شود (Simunek et al., 1999):

(رابطه ۱)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(K_r \frac{dh}{dr} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{dh}{dz} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} - WU(h, r, z)$$

θ رطوبت حجمی خاک [$L^3 L^{-3}$]. زمان t [T]. r و z جهت‌های عرضی و عمودی، K هدایت هیدرولیکی غیر اشباع [$L^3 L^{-3} T^{-1}$] و $WU(h, r, z)$ مقدار جذب آب به وسیله ریشه [$L^3 L^{-3} T^{-1}$] است.

K و WU هر دو تابعی از مقدار رطوبت یا پتانسیل ماتریک خاک‌اند. جذب آب به وسیله ریشه‌ها را می‌توان با رابطه ۲ به دست آورد (Gardenas et al., 2005; Homaei et al., 2002a and 2002b and 2002c):

$$WU(h, r, z) = \gamma(h) RDF(r, z) W \cdot T_{pot} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$\gamma(h)$ تابع بی‌بعد عکس‌العمل تنش رطوبتی است که Feddes et al. (1978) آن را ارائه کردند، $RDF(r, z)$ توزیع جذب آب نرمال‌شده ریشه^۱، W عرض یا شعاعی از سطح خاک است که تعرق از آن صورت می‌گیرد و به وسیله توزیع عرضی ریشه نیز کنترل می‌شود و T_{pot} شدت تعرق پتانسیل است. هر دو پارامتر $\gamma(h)$ و $RDF(r, z)$ تابعی از موقعیت مکانی در ناحیه رشد ریشه‌اند. تابع نرمال $RDF(r, z)$ به کمک رابطه ۳ محاسبه می‌شود و مقدار آن بالای ناحیه رشد ریشه Ω برابر ۱ است (Gardenas et al., 2005):

$$RDF(r, z) = \frac{\beta(r, z)}{\int_{\Omega} \beta(r, z) d\Omega} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$\beta(r, z)$ توزیع مکانی بی‌بعد جذب آب به وسیله ریشه در شرایط بدون تنش آبی است و رابطه ۴ برای آن ارائه شده است (Vrugt et al., 2001):

(رابطه ۴)

$$\beta(r, z) = \left[\left(1 - \frac{z}{Z_m} \right) \right] \left[\left(1 - \frac{r}{r_m} \right) \right] e^{-\left(\frac{p_z}{z_m} \right) |z^* - z| + \left(\frac{p_r}{r_m} \right) |r^* - r|}$$

2. No Flow
3. Free Drainage
4. Atmospheric Boundary Condition
5. Variable Flux

استفاده از حل معکوس در نرم‌افزار RETC و بر اساس داده‌های بافت خاک، مکش ۱۵ اتمسفر، داده‌های TDR و تانسومتر در مکش‌های پایین برابر ۱/۱۹۶ به دست آمد.

آماره‌های محاسبه‌شده برای کل دوره شبیه‌سازی در مرحله صحت‌سنجی در ۵ نقطه در جدول ۵ می‌آید. گفتنی است در جدول ۵ و در مرحله صحت‌سنجی داده‌های رطوبتی نقطه ۳ در شکل ۱ الف، به دلیل نامعتبر بودن، ارائه نشد. دلیل آن وجود پتانسیل ماتریک بالا و خارج از محدوده مجاز قابل اندازه‌گیری به وسیله تانسومتر در نقطه مذکور بود.

جدول ۵. شاخص‌های آماری خطای رطوبت خاک در کل دوره شبیه‌سازی در مرحله واسنجی

شماره نقطه	ME	RMSE	EF	CRM
۱	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۵۸	۰/۰۱
۲	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۶۰	۰/۰۱
۴	۰/۰۴	۰/۰۱۹	۱/۰۰	۰/۰۵
۵	۰/۰۶	۰/۰۲۵	۰/۹۹	۰/۰۱
۶	۰/۱۰	۰/۰۲۰	۰/۹۹	-۰/۰۳
۷	۰/۰۴	۰/۰۱۸	۱/۰۰	۰/۰۱
۸	۰/۰۲	۰/۰۱۰	۰/۱۱	-۰/۰۳
۹	۰/۰۴	۰/۰۲۰	-۰/۱۲	۰/۰۶
۱۰	۰/۰۷	۰/۰۳۰	-۱/۶۹	۰/۰۲

مقادیر نزدیک به ۰ شاخص‌های آماری ME و RMSE و CRM ارائه‌شده در جدول ۵ شبیه‌سازی نسبتاً خوب مدل را نشان می‌دهد. در شاخص آماری EF، که مقادیر نزدیک به ۱ آن مطلوب‌تر است، به جز در نقاط ۸ و ۹ و ۱۰، در سایر نقاط مقدار مناسبی دارد. مقادیر مثبت شاخص آماری CRM در همه نقاط، به جز در نقاط ۶ و ۸، نشان‌دهنده کم‌برآوردی مدل است. حداقل شاخص‌های آماری ME و RMSE و CRM در نقاط ۱ و ۲، که در فاصله ۳۵ سانتی‌متری قطره‌چکان و در اعماق ۴۵ و ۳۰ سانتی‌متری قرار دارند، به ترتیب برابر ۰/۰۲ و ۰/۰۰۸ و ۰/۰۱ هستند.

نتایج صحت‌سنجی رطوبت خاک در شکل ۲ می‌آید. شماره نقاط، عمق و موقعیت آن‌ها نسبت به قطره‌چکان در شکل ۱ الف می‌آید.

نمودارهای ارائه‌شده در شکل ۲ خروجی مدل را در مقایسه با مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری‌شده در نقاط مختلف با فاصله ۰ و ۱۵ و ۳۵ سانتی‌متری و در اعماق مختلف در مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهد. طول دوره شبیه‌سازی ۹۶۵ ساعت است. همان‌گونه که شکل‌ها نشان می‌دهند، مدل

تعیین مدل مناسب در مرحله واسنجی به کمک شاخص‌های آماری شامل حداکثر خطا^۱ (ME)، میانگین ریشه دوم خطا^۲ (RMSE)، کارایی مدل‌سازی^۳ (EF)، و ضریب باقی‌مانده^۴ (CRM) صورت گرفت (Zarei et al., 2010; Homaee et al., 2002c).

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{رابطه ۸})$$

O_i مقادیر اندازه‌گیری‌شده، P_i مقادیر شبیه‌سازی‌شده، و n تعداد نمونه‌های به‌کاررفته و میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده است. حداقل مقدار ME و RMSE برابر ۰ و حداکثر مقدار EF برابر ۱ است. مقادیر زیاد ME می‌تواند نشان‌دهنده کارکرد ضعیف مدل باشد. مقادیر زیاد RMSE نشان‌دهنده بیش‌برآورد و کم‌برآورد مدل در مقایسه با مشاهدات است. آماره EF مقادیر پیش‌بینی‌ها را با میانگین اندازه‌گیری‌ها مقایسه می‌کند. آماره EF و CRM می‌توانند مقادیر منفی نیز باشند. مقدار منفی EF بیانگر آن است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده برآوردی بهتری از مقادیر پیش‌بینی‌شده دارد. آماره CRM نیز نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی است (Zarei et al., 2010).

پس از واسنجی مدل و اطمینان از دقت آن، مدل در ۵ نقطه و برای بازه زمانی ۹۶۵ ساعت (از تاریخ ۱۳۹۱/۰۷/۲۴ تا تاریخ ۱۳۹۱/۰۹/۰۷) صحت‌سنجی شد.

یافته‌ها و بحث

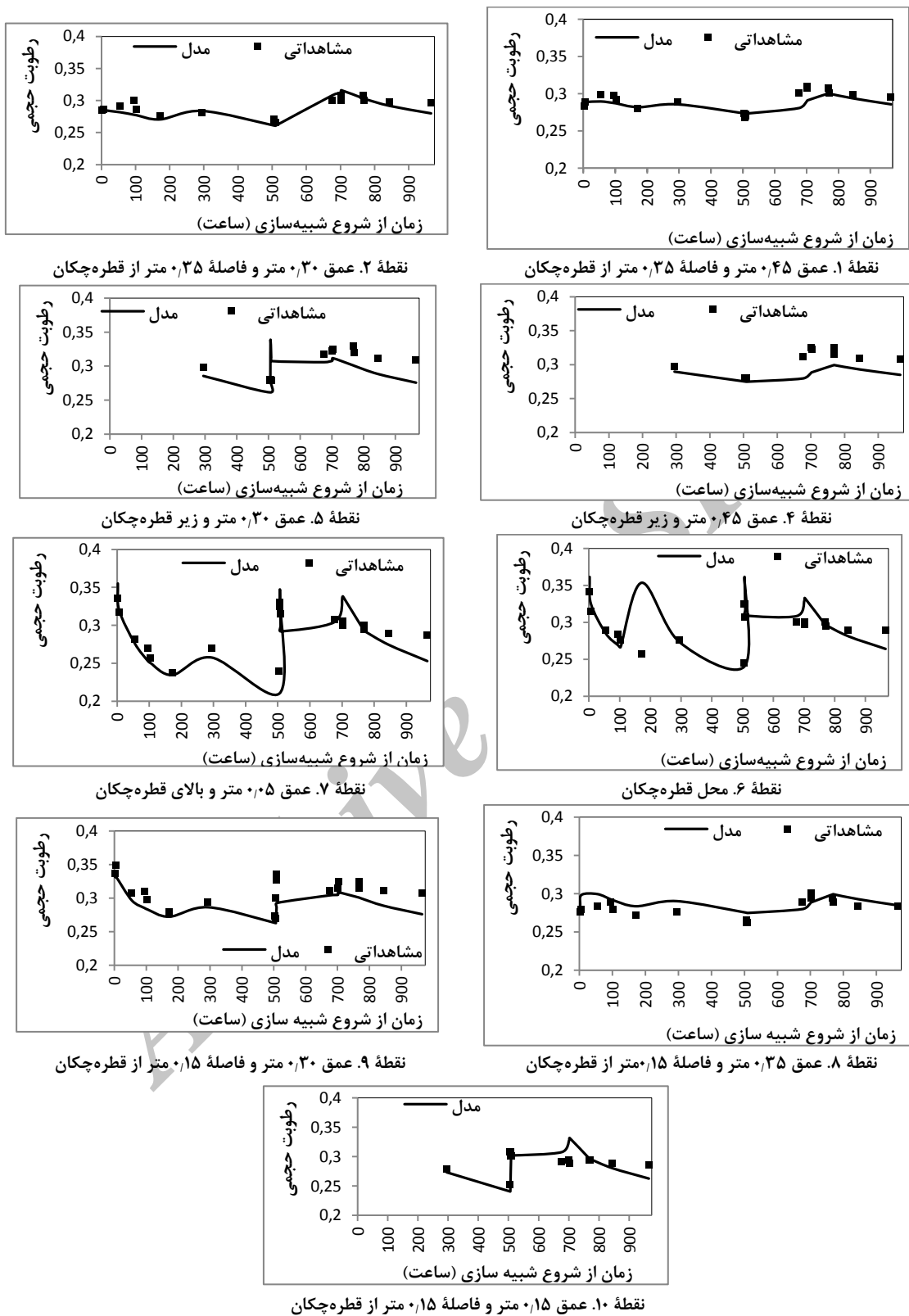
نتایج به‌دست‌آمده به روش حل معکوس در جدول ۴ می‌آید.

جدول ۴. خروجی حل معکوس برای پارامترهای مدل وان‌گنوختن-معلم در مرحله واسنجی

متغیر	$\theta_r [m^3/m^3]$	$\theta_s [m^3/m^3]$	$\alpha [m^{-1}]$	$K_s [cm/h]$	$f [-]$
مقدار	۰/۰۱۳	۰/۳۶	۰/۰۱۶	۱/۰۲	۰/۴۵

مقدار ضریب تبیین مقادیر ارائه‌شده در جدول ۴ برابر ۰/۸۸ است. مقدار پارامتر n در مدل وان‌گنوختن-معلم با

1. Maximum Error
2. Root Mean Square Error
3. Efficiency of Model
4. Coefficient of Residual Mass

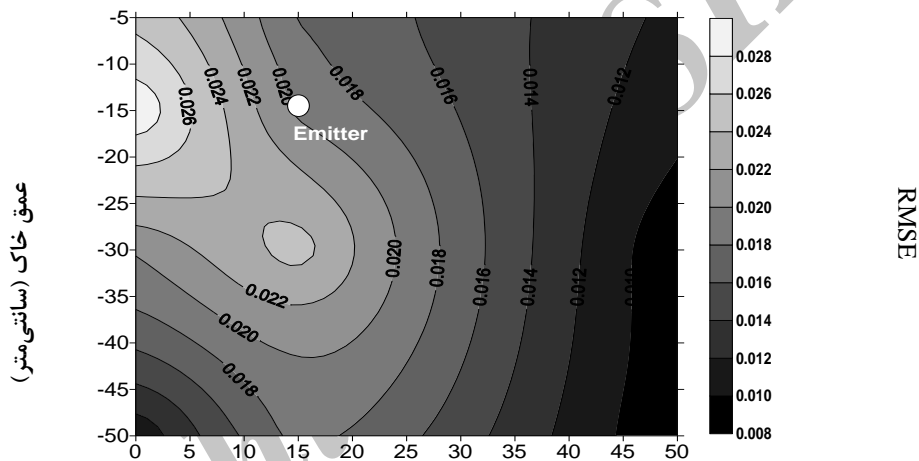


شکل ۲. مقایسه درصد‌های رطوبت شبیه‌سازی شده (مدل) و مشاهداتی برای بازه زمانی ۹۶۵ ساعت از آغاز شبیه‌سازی در مرحله صحت‌سنجی

کرده است. برای مشاهده دقیق‌تر مقدار خطا نسبت به موقعیت قطره‌چکان زیرسطحی، توزیع خطای شاخص RMSE در کل دوره شبیه‌سازی در شکل ۳ می‌آید. مطابق نتایج جدول ۵،

روند تغییرات رطوبت خاک را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. به جز در نقطه ۸، که بین دو خط لترال و در عمق ۴۵ سانتی‌متری قرار گرفته، در سایر نقاط، مدل مقدار رطوبت خاک را کم برآورد

به حالت اشباع نزدیک می‌شود، تغییرات هدایت هیدرولیکی نیز زیاد است. بنابراین، کمترین خطا در تخمین مقدار آن توسط مدل می‌تواند تأثیر زیادی بر اختلاف بین مقدار برآورد مدل و مشاهداتی بگذارد؛ لیکن در نواحی دورتر از قطره‌چکان دامنه تغییرات رطوبتی کم و حتی در نواحی دورتر، که جبهه رطوبتی به آن نمی‌رسد، ناچیز است. بنابراین، مقدار هدایت هیدرولیکی نیز کمتر تغییر می‌کند و در نتیجه شباهت بیشتری بین مقادیر برآورد مدل و مشاهداتی وجود خواهد داشت. دلیل دیگری که ممکن است باعث کاهش دقت مدل در نزدیکی قطره‌چکان شود ماندابی شدن ناحیه نزدیک قطره‌چکان و تأثیر آن بر دبی خروجی قطره‌چکان و در نتیجه کاهش دقت مدل است (Ben-Gal et al., 2004).

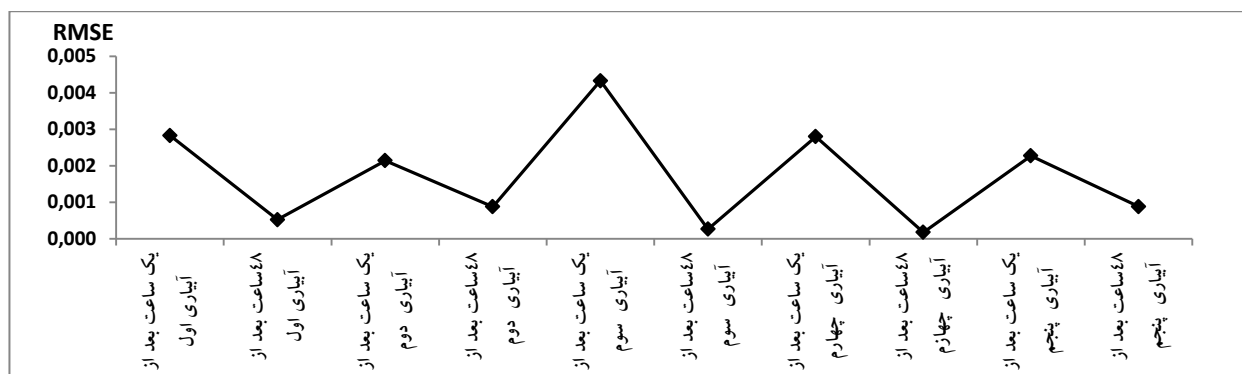


شکل ۳. توزیع خطای RMSE در مرحله صحت‌سنجی برای سراسر مدت شبیه‌سازی فاصله (سانتی‌متر) عمق خاک (سانتی‌متر)

قطره‌چکان شایان توجه است؛ در حالی که در زمان‌های بعد از آن این خطا روندی کاهشی دارد. میانگین مقدار آماره RMSE در کل نقاط برداشت داده، در طول پنج نوبت آبیاری، ۱ و ۴۸ ساعت پس از آبیاری، در شکل ۴ می‌آید. همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، ۴۸ ساعت پس از هر آبیاری، به جز نوبت آبیاری اول، مقدار خطای پیش‌بینی مدل به طور قابل ملاحظه افزایش یافت. پس از گذشت ۴۸ ساعت از زمان آبیاری، مقدار RMSE برابر ۰/۰۰۰۵ بود؛ حال آنکه پس از گذشت ۱ ساعت، شاخص خطا ۰/۰۰۲۹ شد. نتایج نشان می‌دهد مدل HYDRUS-2D با خطای قابل قبول قادر است پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی را شبیه‌سازی کند. همچنین، مدل در رطوبت‌های کم نسبت به رطوبت‌های نزدیک اشباع دقت بالاتری دارد.

حداکثر شاخص خطای RMSE در نقطه ۱۰ (شکل ۱ الف) در فاصله ۱۵ سانتی‌متری قطره‌چکان و عمق ۱۵ سانتی‌متری بین دو خط لترال برابر ۰/۰۳ و حداقل خطا در نقاط ۱ و ۲ در فاصله ۳۵ سانتی‌متری قطره‌چکان و عمق ۵۰ سانتی‌متری برابر ۰/۰۰۸ رخ می‌دهد. بر اساس موقعیت نقاط نسبت به قطره‌چکان زیرسطحی، می‌توان نتیجه گرفت مدل در نقاط دورتر از قطره‌چکان و در عمق‌های بیشتر نتایج بهتری ارائه می‌کند. آنالیز حساسیت نشان داد مدل به هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک حساسیت زیادی دارد. یکی از عوامل مهم مؤثر بر مقدار هدایت هیدرولیکی خاک غیر اشباع مقدار رطوبت خاک است. با تغییر مقدار رطوبت، مقدار هدایت هیدرولیکی در خاک غیر اشباع تغییر می‌کند. در نزدیکی محل قطره‌چکان، که دامنه تغییرات رطوبتی زیاد است و خاک به تدریج از حالت غیر اشباع

بر مبنای نتایج به دست آمده از خاک مزرعه تحقیقاتی، ۴۸ ساعت پس از آبیاری یا بارندگی، نیم‌رخ رطوبتی خاک نسبتاً یکنواخت می‌شود و اصطلاحاً توزیع مجدد رطوبت صورت می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی پنج نوبت آبیاری نشان می‌دهد یک ساعت پس از شروع آبیاری، خطای برآورد مدل نزدیک قطره‌چکان (عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری) بیشتر از دیگر نقاط است. از سوی دیگر، با گذشت ۴۸ ساعت از زمان آبیاری، توزیع رطوبت در نیم‌رخ خاک یکنواخت و میزان خطای برآورد مدل در طول پروفیل خاک یکسان می‌شود. با توجه با اینکه در نقاط مذکور مقدار رطوبت خاک بیشتر است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل در رطوبت‌های بیشتر خطای بیشتر و در رطوبت‌های کمتر خطای کمتری در تخمین مقادیر رطوبت خاک دارد. با بررسی سایر نمودارهای مشابه در نقاط دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که میزان خطای مدل در زمان‌های نزدیک آبیاری و در نقاط نزدیک



شکل ۴. تغییرات آماره RMSE طی پنج نوبت آبیاری در طول دوره شبیه‌سازی، ۱ و ۴۸ ساعت پس از آبیاری

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، دقت شبیه‌سازی توزیع رطوبت تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط وجود تعرق و جذب به وسیله گیاه کاهو، بر اساس داده‌های مزرعه‌ای، طی فصل زراعی، به کمک مدل HYDRUS-2D بررسی شد. نتایج نشان داد خروجی مدل با داده‌های مزرعه‌ای تطابق بسیار خوبی دارد. دقت برآورد توزیع رطوبت قطره‌چکان زیرسطحی در ساعات اولیه آبیاری کمتر و پس از رسیدن رطوبت خاک به توزیع مجدد و یکنواخت شدن رطوبت افزایش یافت. بر اساس موقعیت نقاط نسبت به قطره‌چکان زیرسطحی، می‌توان نتیجه گرفت مدل در نقاط دورتر از قطره‌چکان و در عمق‌های بیشتر نتایج بهتری ارائه می‌کند. به طور کلی، می‌توان گفت مدل HYDRUS-2D می‌تواند پیمایش رطوبتی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی را تحت شرایط وجود تعرق و جذب توسط ریشه گیاه نسبتاً دقیق شبیه‌سازی کند.

سپاسگزاری

نویسندگان از همکاری صمیمانه مسئولان محترم شرکت آب و فاضلاب استان تهران و تصفیه‌خانه جنوب شرق تهران کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.

REFERENCES

Abbasi, F., Jacques, D., Simunek, J., Feyen, J., and van Genuchten, M. Th. (2003a). Inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Heterogeneous soil. *Transactions of the ASAE*, 46(4), 1097-1111.

Abbasi, F., Simunek, J., Feyen, J., Van Genuchten, M. Th., and Shouse, P. J. (2003b). Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Homogeneous soil. *Transactions of the ASAE*, 46(4), 1085-1095.

در پژوهش‌های مشابه، از جمله Wang et al., (2013)، در خاک لومی سیلتی تحت آبیاری زیرسطحی با عمق قطره‌چکان ۲۵ سانتی‌متر، تحت شش نوبت آبیاری، در طول ۱۱۸۰ ساعت شبیه‌سازی، مقادیر RMSE برآورد رطوبت خاک در چهار عمق مختلف خاک بین ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۱۹ گزارش شد. در پژوهش Kandelous and Simunek (2010b) مقادیر خطای برآورد رطوبت حجمی خاک در موقعیت‌های مختلف نسبت به قطره‌چکان زیرسطحی بین ۰/۰۱۱ و ۰/۰۴۵ اعلام شد. همچنین در فواصل زمانی مختلف نسبت به رویداد آبیاری در یک مدل آزمایشگاهی، که همه پارامترهای هیدرولیکی خاک به وسیله مدل نرم‌افزار ROSETTA برآورد شده بود، یک و چهار روز پس از آبیاری، مقدار RMSE برای رطوبت خاک به ترتیب برابر ۰/۰۴۵ و ۰/۰۱۴ به دست آمد. در حالتی دیگر، که پارامترهای هیدرولیکی خاک به جز تخلخل به وسیله مدل نرم‌افزار ROSETTA برآورد شده بود، یک و چهار روز پس از آبیاری، مقدار آماره RMSE برای رطوبت خاک به ترتیب ۰/۰۳۱ و ۰/۰۱۱ بود. مقایسه نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج دیگر پژوهشگران نشان می‌دهد دقت مدل در موقعیت‌های مکانی مختلف نسبت به قطره‌چکان در برآورد رطوبت خاک نسبت به پژوهش Wang et al. (2013) کمتر است. همچنین دقت برآورد مدل از نظر فاصله زمانی پس از آبیاری نسبت به پژوهش Kandelous and Simunek (2010b) بیشتر است.

Arkin, G. F. and Taylor, H. M. (1981). Modifying the root environment to reduce crop stress. *American Society of Agricultural Engineers*.

Ben-Gal, A., Lazorovitch, N., and Shani, U. (2004). Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1407-1413

Besharat, S., Nazemi, A. H., Sadraddini, A. A., and Shahmorad, S. (2012). Applications of HYDRUS and the Proposed SWMRUM Software in Simulating Water Flow with Root Water Uptake Through Soils, *Water and soil science*, Vol: 21.

- No.4. (In Farsi)
- Brouwer, C. and Heibloem, M. (1986). Irrigation water management: Irrigation water needs. Training manual, 3.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J., and Zaradny, H. (1978). *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Gardenas, A. I., Hopmans, J. W., Hanson, B. R., and Simunek, J. (2005). Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation, *Agricultural Water Management* 74: 219-242.
- Homaei, M., Dirksen, C., and Feddes, R. A. (2002a). Simulation of root water uptake: I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*, 57(2), 89-109.
- Homaei, M., Feddes, R. A., and Dirksen, C. (2002b). Simulation of root water uptake: II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. *Agricultural water management*, 57(2), 111-126.
- Homaei, M., Feddes, R. A., and Dirksen, C. (2002c). Simulation of root water uptake: III. Non-uniform transient combined salinity and water stress. *Agricultural water management*, 57(2), 127-144.
- Kandelous, M. and Simunek, J. (2010a). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28(5), 435-444
- Kandelous, M. and Simunek, J. (2010b). Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 97(7), 1070-1076.
- Li, J. and Liu, Y. (2011). Water and nitrate distributions as affected by layered-textural soil and buried dripline depth under subsurface drip fertigation. *Irrigation Science*, 29(6), 469-478.
- Patel, N. and Rajput, T. B. S. (2007). Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. *Agricultural water management*, 88(1), 209-223.
- Provenzano, G. (2007). Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 342-349.
- Ritchie, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water resources research*, 8(5), 1204-1213.
- Simunek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M. Th. (1999). The Hydrus2D Software Package for Simulating Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variable Saturated Media. Version 2.0. IGWMC-TPS-53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, pp. 1-251.
- Singh, D. K., Rajput, T. B. S., Sikarwar, H. S., Sahoo, R. N., and Ahmad, T. (2006). Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural water management*, 83(1), 1. 30-134.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Simunek, J., and Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130(4), 304-310.
- Thompson, T. L. and Doerge, T. A. (1995). Nitrogen and water rates for subsurface trickle-irrigated romaine lettuce. *HortScience*, 30(6), 1233-1237.
- Vrugt J. A., Hopmans, J. W., and Simunek, J. (2001). Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *SoilSc. Soc. Am. J.* 65: 1027-1037.
- Wang, J., Gong, S., Xu, D., Juan, S., and Mu, J. (2013). Numerical simulations and validation of water flow and heat transport in a subsurface drip irrigation system using hdrus-2D., *Irrigation and Drainage*, 62: 97-106.
- Zarei, G., Homaei, M., Liaghat, A. M., and Hoorfar, A. H. (2010). A model for soil surface evaporation based on Campbell's retention curve. *Journal of hydrology*, 380(3), 356-361.