

شبیه‌سازی جبهه‌ی رطوبتی خاک با مدل HYDRUS-2D در دو نوع کشت با خاکورزی و بی‌خاکورزی

هدیه پوریزدان‌خواه^{۱*}، محمدرضا خالدیان

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری وزه‌کشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران؛

h_pyazdankhah@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران؛

khaledian@guilan.ac.ir

چکیده

در بیشتر موارد، به منظور پیش‌بینی وضعیت رطوبتی خاک، قبل از نصب سیستم آبیاری، شبیه‌سازی‌هایی توسط مدل‌های ریاضی صورت می‌گیرد تا طراحی صحیحی جهت تأمین نیاز آبی گیاه انجام شود. از طرفی، امروزه جهت بالا بردن راندمان کاربرد آب، کشت بدون خاکورزی مورد بحث بسیاری از مهندسين و طراحان قرار گرفته است. در این تحقیق، عملکرد مدل شبیه‌سازی HYDRUS-2D در دو نوع کشت با خاکورزی و بدون خاکورزی مورد بررسی قرار گرفت. برای هر سیستم کشت، مزرعه‌ای تحت کشت ذرت و تحت آبیاری با تیپ در نظر گرفته شد و رطوبت خاک توسط یک نوترون‌متر در اعماق مختلف قبل و بعد از آبیاری در هر مزرعه اندازه‌گیری شد و با رطوبت‌های شبیه‌سازی شده با مدل براساس آماره‌های RMSE و EF مقایسه شد. در مزرعه تحت کشت با خاکورزی مشاهده شد که با اعمال داده‌های هدایت هیدرولیکی خاک قبل از آبیاری، مدل قادر به شبیه‌سازی کل دوره‌ی ۲۹ روزه نمی‌باشد، زیرا عمل خاکورزی باعث بزرگ‌تر شدن خلل و فرج خاک و در نتیجه افزایش هدایت هیدرولیکی خاک (K_s) می‌شود، پس از اولین آبیاری به علت فشرده شدن لایه‌ی اول خاک K_s آن کاهش می‌یابد، که با اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک، شبیه‌سازی مدل بهبود می‌یابد. اما در کشت بدون خاکورزی، مشاهده شد که با اعمال پارامترهای هیدرولیکی خاک قبل از آبیاری به‌عنوان ورودی، مدل می‌تواند کل دوره را به خوبی شبیه‌سازی کند زیرا در این نوع کشت ساختمان خاک و متعاقباً K_s خاک در طی آبیاری به‌طور جزئی تغییر می‌کند و بنابراین می‌توان در شبیه‌سازی با مدل، به نتایج واقعی‌تری دست یافت.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هیدرولیکی خاک، هدایت هیدرولیکی خاک، آبیاری

مقدمه

را شبیه‌سازی کنند. چنانچه صحت عملکرد مدلی تأیید شود، می‌توان قبل از اجرای سیستم، شرایط توزیع رطوبت و ابعاد پياز رطوبتی ایجاد شده در خاک مورد نظر را با مدل مذکور شبیه‌سازی کرد و ابعاد رطوبتی

طراحی سیستم آبیاری باید دقیق و مطابق با خصوصیات خاک و گیاه باشد. امروزه مدل‌هایی وجود دارند که می‌توانند الگوی توزیع آب در خاک

۱. آدرس نویسنده مسؤول: گیلان، رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب

* دریافت: شهریور، ۱۳۹۱ و پذیرش: اردیبهشت، ۱۳۹۲

مواد محلول و نحوه‌ی توزیع رطوبت در اطراف قطره‌چکان را تحت خاک لومی‌رسی با مدل شبیه‌سازی نمودند و با نتایج آزمایشگاهی و صحرایی مقایسه کردند که نتایج، همبستگی بسیار خوب مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده را نشان داد. طی تحقیقی، الگوی پیاز رطوبتی تحت آبیاری با لوله‌های سفالی در بافت‌های متوسط و سبک خاک اندازه‌گیری و با نرم‌افزار HYDRUS شبیه‌سازی شد. مقایسه نتایج نشان داد که برای طراحی این سیستم نیز، می‌توان از این مدل استفاده کرد (سیال و اسکاگز، ۲۰۰۹). اژدری (۱۳۹۱) برای یک مزرعه تحت کشت فلفل سبز، حرکت آب در خاک را با اعمال یک سیستم کودآبیاری با مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی نمود، نتایج نشان داد که با طراحی دقیق یک سیستم کودآبیاری براساس برآورد دقیق پارامترهای هیدرولیکی خاک، می‌توان از تلفات نفوذ آب جلوگیری نمود به طوری که در تحقیق انجام شده با تجمع آب در لایه‌ی بالای خاک و در عمق توسعه‌ی ریشه، مقدار آب زهکش شده، ۱/۵ درصد از کل آب توزیع شده در مزرعه برآورد شد. لیگا و اسلاک (۲۰۰۴) عنوان نمودند که برای ارائه‌ی شکل توزیع رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌توان از مدل HYDRUS-2D استفاده نمود و اظهارات خود را با اجرا کردن مدل توسط یکسری داده‌های مجازی به تأیید رساندند. کندلوس و همکاران (۱۳۸۵) نیز، کارایی این مدل را در شبیه‌سازی جبهه‌ی رطوبتی تحت آبیاری زیر سطحی برای شرایط مزرعه تأیید نمودند. پاتل و راجپوت (۲۰۰۸) نیز پیاز رطوبتی و نحوه‌ی حرکت آب را در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری نسبت به محل استقرار قطره‌چکان‌ها تحت آبیاری زیرسطحی بررسی نمودند و با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج مزرعه‌ای مشاهده نمودند که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. عباسی و تاجیک (۱۳۸۶) با استفاده از این مدل به‌طور همزمان، پارامترهای هیدرولیکی و انتقال

مدل شده را با ابعاد منطقه توسعه‌ی ریشه مقایسه و سپس نسبت به اجرای سیستم اقدام کرد. در صورتی که سیستم اجرا شده باشد، می‌توان با کمک گرفتن از مدل، راهکارهای مدیریتی مناسبی را پیشنهاد داد (بوین و همکاران، ۲۰۰۶). در سال‌های اخیر مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی زیادی برای ارزیابی و طراحی سیستم‌های آبیاری معرفی شده است که می‌توان به مدل‌های تجربی شوارترزمن و زور (۱۹۸۶) و امین و اخماج (۲۰۰۶) برای آبیاری قطره‌ای سطحی و کندلوس و همکاران (۲۰۰۸) برای آبیاری زیرسطحی و مدل تحلیلی WetUp (کوک و همکاران، ۲۰۰۳) و مدل عددی HYDRUS-2D (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹) اشاره نمود. طی تحقیقی برای مقایسه مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی در برآورد ابعاد الگوی خیس‌شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، مدل‌های تجربی شوارترزمن و زور، امین و اخماج، کندلوس و همکاران، مدل عددی HYDRUS-2D و مدل تجربی WetUp با یکدیگر مقایسه شد. برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، نتایج نشان داد که مدل HYDRUS-2D نتایج بهتری را نسبت به مدل‌های WetUp و کندلوس و همکاران، داشته است و در آبیاری قطره‌ای سطحی نتایج نشان داد که مدل‌های HYDRUS-2D و امین و اخماج نتایج بهتری نسبت به دو مدل دیگر ارائه داده‌اند. مدل HYDRUS-2D به دلیل شبیه‌سازی خوب و قابلیت استفاده در دو آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به‌عنوان بهترین مدل معرفی شد (کندلوس و سیمونک، ۲۰۱۰a).

مدل HYDRUS-2D یک مدل جامع تحت سیستم عامل ویندوز و برای حرکت آب، املاح و گرما داخل خاک است که برای شرایط مختلف خاک و آب ورودی به داخل خاک توانایی شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک را دارد. هم‌چنین قادر است خصوصیات هیدرولیکی خاک را به روش معکوس شبیه‌سازی نماید. کندلوس و سیمونک (کندلوس و سیمونک، ۲۰۱۰b)، حرکت گرما و

برای یک مزرعه تحت کشت ذرت به صورت بی‌خاکورزی و با خاکورزی که با تیپ آبیاری می‌شد، با یکدیگر مقایسه شدند. از آنجا که هدایت هیدرولیکی خاک شخم خورده، پس از اولین آبیاری به دلیل فشرده شدن لایه‌های خاک به طور محسوسی تغییر می‌کند (مبارک، ۲۰۰۸)، برای سیستم کشت باخاکورزی، تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک نیز در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

در ۲۴ آوریل سال ۲۰۰۷، در دو مزرعه مجاور هم واقع در ایستگاه تحقیقاتی ایرستا، در شهر مونپلیه فرانسه (۴۰°N و ۵۰°E)، گیاه ذرت با فواصل ردیفی ۰/۷۵ متر از یکدیگر کشت شد. در یک مزرعه خاک سطحی شخم خورد و در مزرعه‌ی دیگر برای جلوگیری از تبخیر، سطح خاک شخم نخورده با مالچ پوشانده شده بود. برای هر دو مزرعه، طی دو ماه اول فصل زراعی به دلیل بارندگی‌های بهاره در منطقه، آبیاری انجام نشد و در ابتدای ماه ژوئن، نوارهای تیپ آبیاری که فواصل قطره‌چکان‌های آن از هم ۳۰ سانتی‌متر بود یکی در میان در بین ردیف‌های گیاهی قرار داده شد یعنی به ازای هر دو ردیف کشت، یک ردیف تیپ آبیاری مستقر شد، بنابراین فواصل بین لاترال‌ها ۱/۵ متر بود. دبی تیپ ۳/۶۷ لیتر بر ساعت بر متر بود و اولین آبیاری در مرحله ۱۲ برگ‌ی توسعه گیاه حدود ۲ ماه بعد از کاشت و در تاریخ ۱۹ ژوئن برای مدت تقریبی ۷/۵ ساعت انجام شد، در سایر روزها طبق برنامه‌ریزی منظم، آبیاری به مدت ۳ ساعت اعمال شد و در روزهای قبل و بعد از روزهای تعطیل (شنبه و یکشنبه) آبیاری تکمیلی انجام گردید یعنی مجموعاً به مدت ۶ ساعت آبیاری اعمال شد. رطوبت خاک، در هر ۱۰ سانتی‌متر از عمق ۰-۱۵۰ سانتی‌متر در روزهای ۱۸، ۲۰، ۲۷ ژوئن و ۳، ۶، ۱۰، ۱۳ و ۱۷ جولای توسط یک نوترون‌متر در محل ردیف گیاهی و در بین دو گیاه، قرائت گردید.

املاح در خاک را تحت آبیاری جویچه‌ای و به روش حل معکوس به دست آوردند.

با توجه به اینکه رابطه‌ی بین چگونگی خلل و فرج حاصل از شخم زدن خاک و نفوذ، نقش مهمی در ویژگی‌های انتقال آب و املاح در خاک ایفاء می‌کند، تحقیق حاضر، برای مقایسه‌ی شبیه‌سازی دو روش کشت بدون خاکورزی و با خاکورزی با مدل HYDRUS-2D انجام شد. در واقع کشت بدون خاکورزی یک روش مدیریت خاک است که راندمان بالاتری را در ارتقاء کیفیت خاک نسبت به روش‌های کشت سنتی دارد، اگرچه مؤثر بودن آن، بستگی زیادی به وضعیت آب و هوایی، مقدار مالچ روی سطح خاک و مدیریت خاک دارد. شخم زدن می‌تواند تأثیر زیادی در توزیع و اندازه‌ی خلل و فرج خاک داشته باشد. خاک تحت کشت با اعمال خاکورزی عموماً وزن مخصوص ظاهری کمتر و درصد تخلخل بیشتری را نسبت به خاک بدون خاکورزی به خصوص در لایه‌ی شخم خورده دارا می‌باشد (لیبیک و همکاران، ۲۰۰۶). در کشت بی‌خاکورزی، به دلیل جریان‌های گذرنده از تخلخل‌های درشت و مؤثر ایجاد شده توسط میکروارگانیزم‌ها، کرم‌ها و ریشه‌ی گیاهان، شدت نفوذ افزایش می‌یابد (لامپورلانس و همکاران، ۲۰۰۶)؛ تخلخلی که سازل و همکاران (۲۰۰۶) آن را به عنوان خلل و فرج‌های زیستی^۱ عنوان نمودند و آن را در حرکت آب و املاح جهت رشد ریشه بسیار مؤثر دانسته‌اند، زیرا این خلل و فرج‌ها پیچ و خم‌های کمتری دارند و هم‌چنین پیوسته و ممتد هستند و در نتیجه پایدارتر از خلل و فرج‌هایی هستند که توسط شخم زدن ایجاد می‌شوند (هوبارد و همکاران، ۲۰۰۱).

با توجه به متفاوت بودن ساختمان خاک و متعاقباً نحوه‌ی حرکت آب درون خاک در دو نوع سیستم کشت بی‌خاکورزی و با خاکورزی، در این تحقیق، عملکرد مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی جبهه‌ی رطوبتی خاک

^۱ Bio-pores

نقطه، جریان ثابتی برابر با q دارد که مقدار آن با تقسیم شدت جریان خروجی در هر متر از تیپ (Q) بر مساحت سطحی هر متر تیپ (A) به دست می آید. شعاع تیپ در حین آبیاری ۱ سانتی متر اندازه گیری شد.

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{3.67 \times 10^{-3} m^3 \cdot h^{-1}}{2\pi(0.01m)(1m)} = 0.0584 m \cdot h^{-1}$$

در این تحقیق، سیستم ریشه ذرت در ماه آوریل مستقر شد و در نیمه اول ماه جولای به بیشترین حد رشد خود رسید، قبل از آبیاری، سیستم ریشه به طور طبیعی توسعه می یابد و فرض می شود که تقارن در زیر ساقه ذرت وجود دارد. پس از آبیاری، از آنجا که تیپها به صورت یکی در میان در بین ردیفهای گیاهی قرار می گیرند، سیستم ریشه به سمت نوارهای تیپ متمایل می شوند (مبارک و همکاران، ۲۰۰۱). جهت اعمال توسعه ریشه جهت در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی خاک در کشت با خاکورزی، رشد ریشه به دو مرحله تقسیم شده است. اولین مرحله، وجود تقارن ریشه، برای دو هفته اول پس از اولین آبیاری اعمال شد و مرحله دوم برای شبیه سازی هفته دوم (۳ جولای) به بعد اعمال گردید (شکل ۲). الگوی توزیع جذب آب توسط ریشه نیز این طور فرض شد که ۴۰٪ جذب آب در یک چهارم بالای ریشه صورت می گیرد و به ترتیب به ۳۰٪، ۲۰٪ و ۱۰٪ کاهش می یابد.

خاک تحت کشت عمیق و لومی است و سه لایه مختلف در پروفیل خاک وجود دارد که ویژگیهای هیدرولیکی آنها در جدول (۱) و (۲) به ترتیب برای مزرعه با خاکورزی و بی خاکورزی آورده شده است.

رطوبت اشباع با رابطه $(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s})$ و رطوبت در نقطه ورود هوا با مدل BEST (لاساباتر و همکاران، ۲۰۰۶) برآورد شد و سایر پارامترها بر اساس مدل ون گنوختن موجود در مدل BEST برآورد گردید. هدایت هیدرولیکی لایه اول خاک با روش نفوذسنج Beerkan (مبارک و

از آنجا که فواصل بین قطره چکانها روی تیپ خیلی کم است (۳۰ سانتی متر)، به جز دقایق اولیه آبیاری که حرکت آب سه بعدی است، تیپ می تواند به عنوان یک منبع خطی مورد بررسی قرار گیرد، از این رو، می توان از یک بعد صرف نظر کرد و جریان را در دو بعد (x و z) بررسی نمود (اسکاگر و همکاران، ۲۰۰۴)، شبیه سازی جریان آب در خاک در مدل HYDRUS-2D با استفاده از حل عددی معادله دو بعدی ریچاردز (معادله ۱) انجام می شود که با فرض خاک همروند و یکنواخت به صورت زیر ارائه می گردد:

(۱)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K(h)) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K(h)) \frac{\partial h}{\partial z} - S(h, x, z)$$

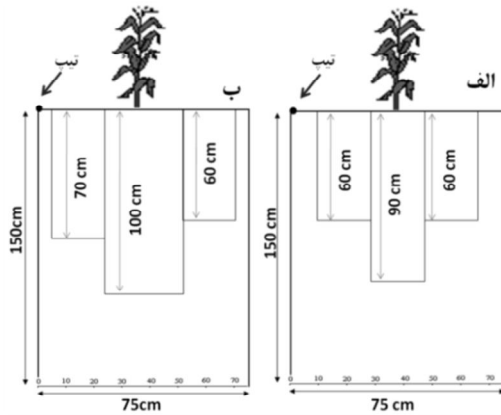
که در آن، θ رطوبت حجمی خاک، t زمان، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک، x محور افقی و z محور عمودی (رو به بالا، مثبت)، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی و $S(h, x, z)$ جذب آب توسط ریشه گیاه است که بر اساس مدل Feddes موجود در نرم افزار HYDRUS-2D محاسبه شد (فدس و همکاران، ۱۹۷۸).

نیم رخ عمودی خاک به صورت متقارن و دو بعدی در نظر گرفته شد. پروفیل شبیه سازی شده شامل یک تیپ آبیاری و دو ردیف کشت است (شکل ۱). بعد افقی حوزه ۱/۵ متر، برابر با فواصل بین تیپهای آبیاری و بعد عمودی آن نیز ۱/۵ متر فرض شد که ستون خاک اندازه گیری شده را شامل می شود. فرض شده است که جریان آب جانبی در طول مرزها صفر است و مرز زیرین به عنوان مرز زهکش آزاد برای مدل تعریف شد.

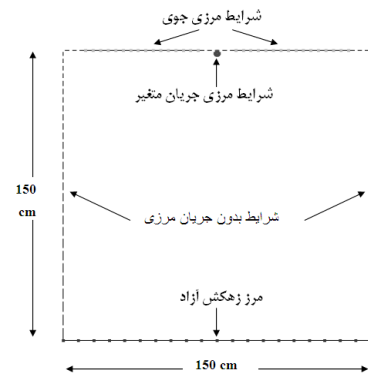
تبخیر و تعرق گیاهی با مدل PILOTE برای هر دو مزرعه شبیه سازی شد، چون در این مرحله از رشد گیاه، شاخص سطح برگ بیش از ۲/۵ بود، به دلیل گستردگی سطح برگ و سایه اندازی آن مقدار تبخیر از سطح خاک بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است (خالدیان و همکاران، ۲۰۰۹). در هنگام آبیاری، منبع خطی در هر

تعیین شد (مولر، ۲۰۰۱).

همکاران، ۲۰۰۱) تعیین گردید و هدایت هیدرولیکی خاک در لایه‌های دوم و سوم با روش استوانه‌های مضاعف



شکل ۲- نحوه‌ی توزیع سیستم ریشه؛ الف) مرحله اول: دو هفته اول بعد از اولین آبیاری (ب) مرحله دوم: از ۳ جولای تا انتهای دوره شبیه‌سازی



شکل ۱- پروفیل شبیه‌سازی شده و شرایط اعمال شده در مدل HYDRUS-2D

که در آن، α پارامتری در مدل ون گنوختن است $[L^{-1}]$ ؛ I پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک است که ۰/۵ در نظر گرفته شد؛ m و n پارامترهای شکل منحنی مشخصه‌ی خاک‌اند؛ θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و رطوبت حجمی باقیمانده در خاک هستند $[L^3 L^{-3}]$ و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است $[LT^{-1}]$.

برای تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از معادله‌ی ون گنوختن - معلم برای $\theta(h)$ (معادله ۲) و $K(\theta)$ (معادله ۳) استفاده شد (معلم، ۱۹۷۶).

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h| n)^{-m} \text{ with } 1 - \frac{1}{n} \quad m=1- \quad (2)$$

$$\frac{K(h)}{K_s} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^2 \quad (3)$$

جدول ۱- ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و پارامترهای معادله ون گنوختن - معلم برای مزرعه باخاکورزی

| | θ_r ($cm^3 cm^{-3}$) | θ_s ($cm^3 cm^{-3}$) | α (m^{-1}) | n (-) | K_s ($m hr^{-1}$) | l (-) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|
| ۱ | ۰ | ۰/۴۱ | ۶/۲۲۱ | ۱/۲۱۷۵ | $۳/۲۲ \times ۱۰^{-۲}$ | ۰/۵ |
| لایه اول (۰ - ۵۵ cm) | ۰ | ۰/۳۶ | ۴/۳۶۲ | ۱/۲۲۷۴ | $۱/۱۳ \times ۱۰^{-۲}$ | ۰/۵ |
| ۲ | ۰ | ۰/۳۶ | ۲/۷۲۷ | ۱/۲۲۶۷ | $۷/۳۴ \times ۱۰^{-۳}$ | ۰/۵ |
| لایه دوم (۵۵ - ۹۰ cm) | ۰/۰۵ | ۰/۳۸ | ۱/۳ | ۱/۴۴۷ | $۵/۰۰ \times ۱۰^{-۳}$ | ۰/۵ |
| ۳ | ۰/۰۹۵ | ۰/۴۱ | ۱/۹ | ۱/۳۱ | $۲/۵۸ \times ۱۰^{-۳}$ | ۰/۵ |
| لایه سوم (۹۰ - ۱۵۰ cm) | | | | | | |

^۱ ویژگی‌های هیدرولیکی خاک قبل از اولین آبیاری، ^۲ ویژگی‌های هیدرولیکی خاک یک روز بعد از اولین آبیاری، ^۳ ویژگی‌های هیدرولیکی خاک دو هفته بعد از اولین آبیاری

جدول ۲- ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و پارامترهای معادله ون گنوختن - معلم برای مزرعه بی خاکورزی

| عمق هر لایه از خاک | θ_r ($cm^3 cm^{-3}$) | θ_s ($cm^3 cm^{-3}$) | α (m^{-1}) | n (-) | K_s ($m hr^{-1}$) | l (-) |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|
| لایه اول (۰ - ۳۰ cm) | ۰ | ۰/۵ | ۰/۱۱۴۹ | ۱/۲۱۷۵ | $۲/۵ \times ۱۰^{-۲}$ | ۰/۵ |
| لایه دوم (۳۰ - ۹۰ cm) | ۰/۰۵ | ۰/۳۸ | ۰/۰۱۳ | ۱/۴۴۷ | ۵×۱۰^{-۳} | ۰/۵ |

نوترون متر اندازه‌گیری شده بود، به مدل داده شد، ۲ روز شبیه‌سازی تعریف گردید، یک‌بار داده‌ی قرائت شده در روز ۲۰ ژوئن به مدل داده شد و ۱۳ روز شبیه‌سازی تعریف گردید و بعد داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده در روز ۳ جولای به مدل داده شد و ۱۴ روز شبیه‌سازی تعریف گردید که در روزهایی که با نوترون متر قرائت انجام شد، رطوبت شبیه‌سازی شده با رطوبت‌های اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. شکل ۳ روزهای مربوط به داده‌های ورودی و خروجی را در هر مرحله نشان می‌دهد.

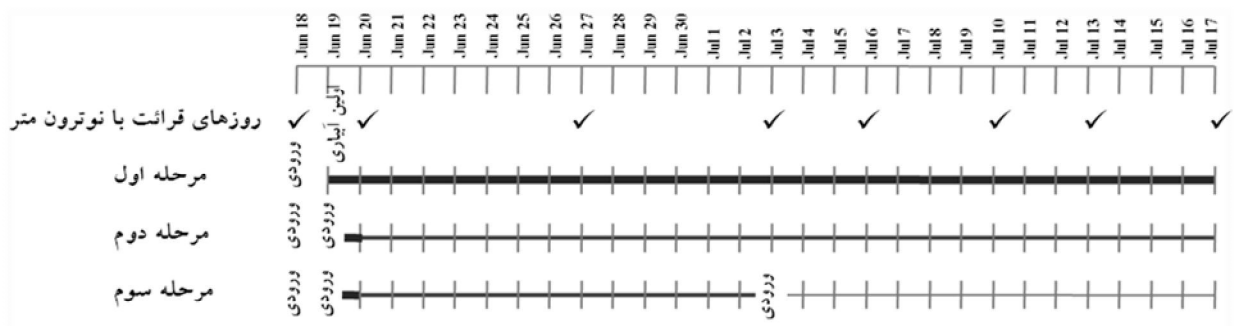
جهت ارزیابی کارایی مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده در هر مرحله در روزهای ۲۰ و ۲۷ ژوئن و ۳، ۶، ۱۰، ۱۳ و ۱۷ جولای با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط نوترون متر مقایسه و نتایج با آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا، RMSE (معادله ۴) و ضریب کارایی مدل، EF بر اساس معادله ۵ (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰) سنجیده شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - I(m)_j)^2}{n}} \quad (4)$$

$$EF = 1 - \left(\frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - I(m)_j)^2}{\sum_{j=1}^n (I(m)_j - \bar{I}(m))^2} \right) \quad (5)$$

که در آن، $I(p)_j$ مقدار رطوبت شبیه‌سازی شده در عمق j ؛ $I(m)_j$ مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در عمق j ؛ $\bar{I}(m)$ میانگین مقادیر رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و n تعداد اعماق مورد نظر است.

به‌منظور بررسی اثر تغییرات زمانی در کشت باخاکورزی، پارامترهای هیدرولیکی خاک در سه مرحله‌ی قبل از اولین آبیاری، یک روز بعد از اولین آبیاری و دو هفته بعد از اولین آبیاری، برای لایه اول خاک اندازه‌گیری شدند و رطوبت‌خاک در اعماق مختلف در روزهای ۱۸ ژوئن (یک روز قبل از آبیاری)، ۲۰ ژوئن (یک روز بعد از آبیاری)، ۲۷ ژوئن، ۳ جولای (۲ هفته بعد از اولین آبیاری)، ۶، ۱۰، ۱۳ و ۱۷ جولای با نوترون متر اندازه‌گیری شد. شبیه‌سازی در سه مرحله به‌صورت زیر انجام شد: برای مرحله‌ی اول داده‌های رطوبتی اندازه‌گیری شده با نوترون متر در روز ۱۸ ژوئن به عنوان رطوبت اولیه‌ی خاک به مدل داده شد و ۲۹ روز شبیه‌سازی برای مدل تعریف گردید و مدل مقادیر رطوبتی را از ۱۹ ژوئن تا ۱۷ جولای شبیه‌سازی نمود. در مرحله‌ی دوم یک‌بار داده‌های روز ۱۸ ژوئن به مدل داده شد و ۲ روز شبیه‌سازی تعریف شد، مدل داده‌های خروجی را در روز ۲۰ ژوئن شبیه‌سازی نمود که با داده‌های اندازه‌گیری شده در آن روز مقایسه شد و بعد داده‌های روز ۲۰ ژوئن را که با نوترون متر اندازه‌گیری گردید به عنوان ورودی به مدل داده شد و مدل رطوبت را برای روزهای ۲۱ ژوئن تا ۱۷ جولای شبیه‌سازی نمود که مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده در روزهای ۲۷ ژوئن، ۳، ۶، ۱۳ و ۱۷ جولای با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در این روزها با یکدیگر مقایسه شدند. در مرحله‌ی سوم، در واقع سه بازه‌ی زمانی اعمال گردید که یک‌بار داده‌های رطوبت در روز ۱۸ ژوئن که با



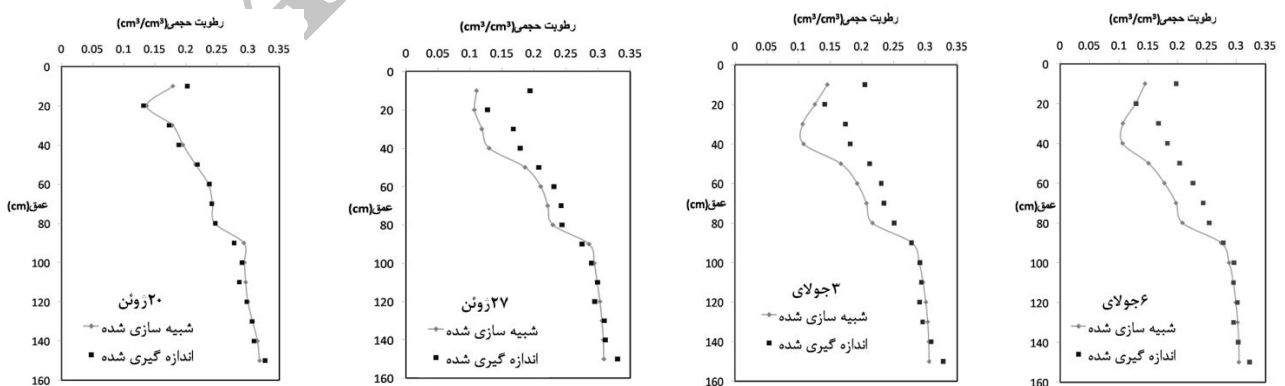
شکل ۳. سه مرحله شبیه‌سازی و روزهای مربوط به داده‌های ورودی و خروجی مقادیر رطوبت؛ H_1 ، H_2 و H_3 به ترتیب خروجی‌های حاصل از اعمال تغییرات زمانی در روزهای قبل از اولین آبیاری، یک روز بعد از اولین آبیاری و دو هفته بعد از اولین آبیاری

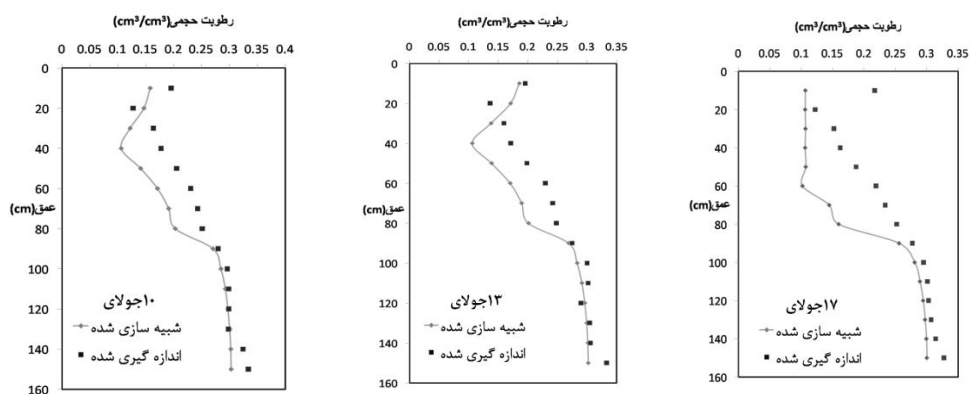
تغییرات زمانی، به ۸۸٪ رسید درحالی‌که برای کشت بدون خاکورزی، مدل توانسته است با داده‌های خصوصیات هیدرولیکی خاک در قبل از آبیاری، کل دوره را به خوبی شبیه‌سازی نماید.

علت این امر آن است که در خاک کشت باخاکورزی، پس از اعمال خاکورزی، ابتدا، خلل و فرج زیاد و درشتی در خاک ایجاد می‌شود که باعث عبور سریع جریان آب و افزایش هدایت هیدرولیکی خاک می‌شود، لایه سطحی خاک که به دلیل شخم خوردن نرم می‌شود؛ در طی آبیاری فشرده می‌شود که باعث کاهش هدایت هیدرولیکی خاک می‌گردد. این امر در آبیاری اول محسوس‌تر است.

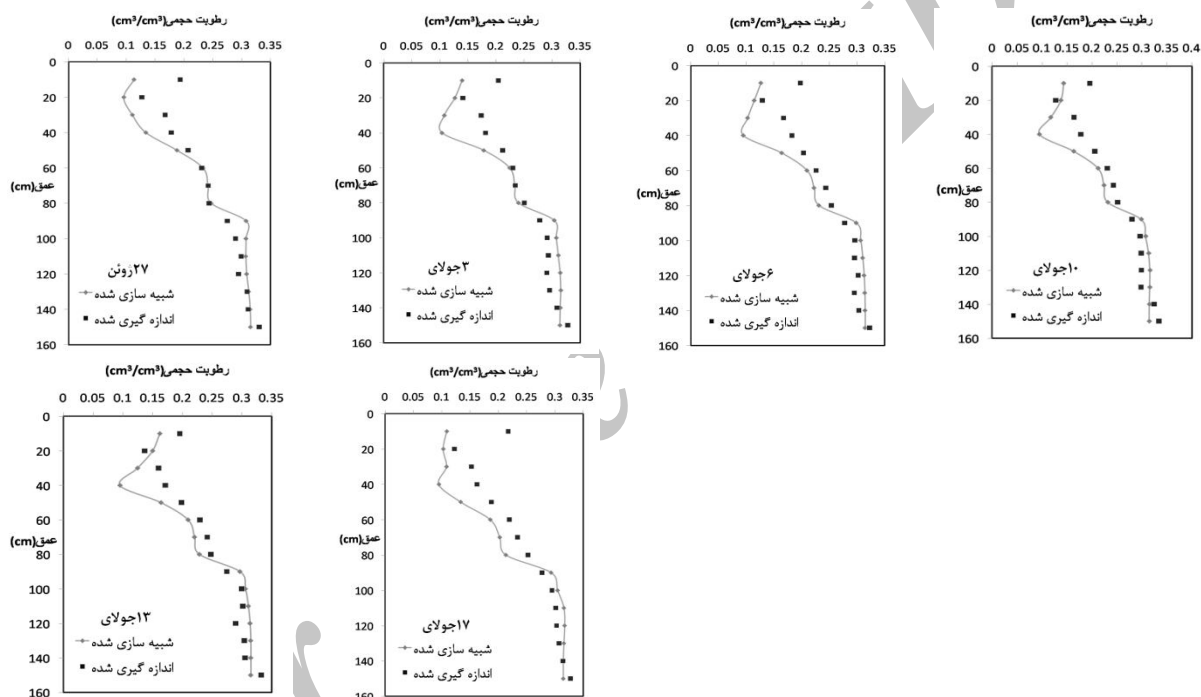
نتایج و بحث

نمودارهای مقایسه‌ی رطوبت‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای کشت باخاکورزی در مراحل مختلف در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ و برای کشت بی‌خاکورزی در شکل ۷ آورده شده است. شاخص‌های ارزیابی مدل در جداول ۳ و ۴ آورده شده‌اند. نتایج آماره‌ها در کشت باخاکورزی نشان می‌دهند که مدل HYDRUS-2D با اعمال تغییرات خصوصیات هیدرولیکی خاک در طی آبیاری، برآورد بهتری داشته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب کارایی مدل در مرحله اول که خصوصیات هیدرولیکی خاک در قبل از آبیاری به عنوان ورودی مدل استفاده شد، ۸ درصد برآورد شد که با اعمال



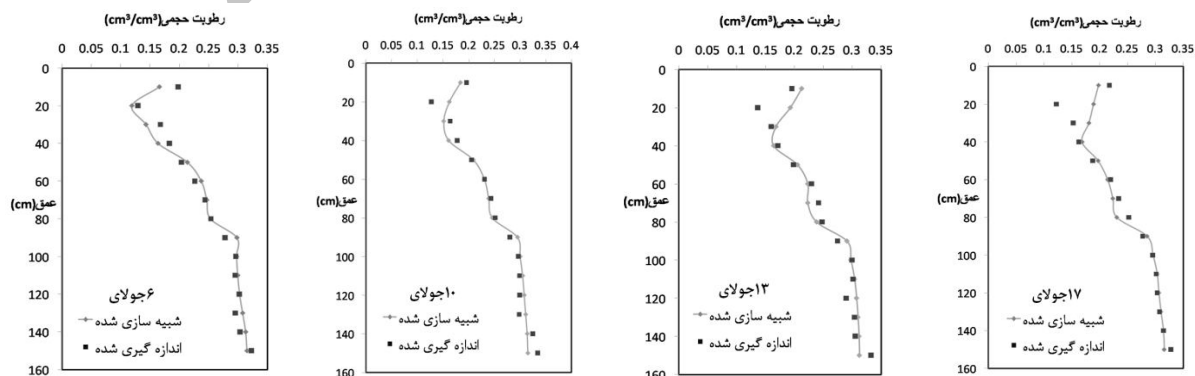


شکل ۴- مقایسه مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده در مرحله اول کشت با خاکورزی



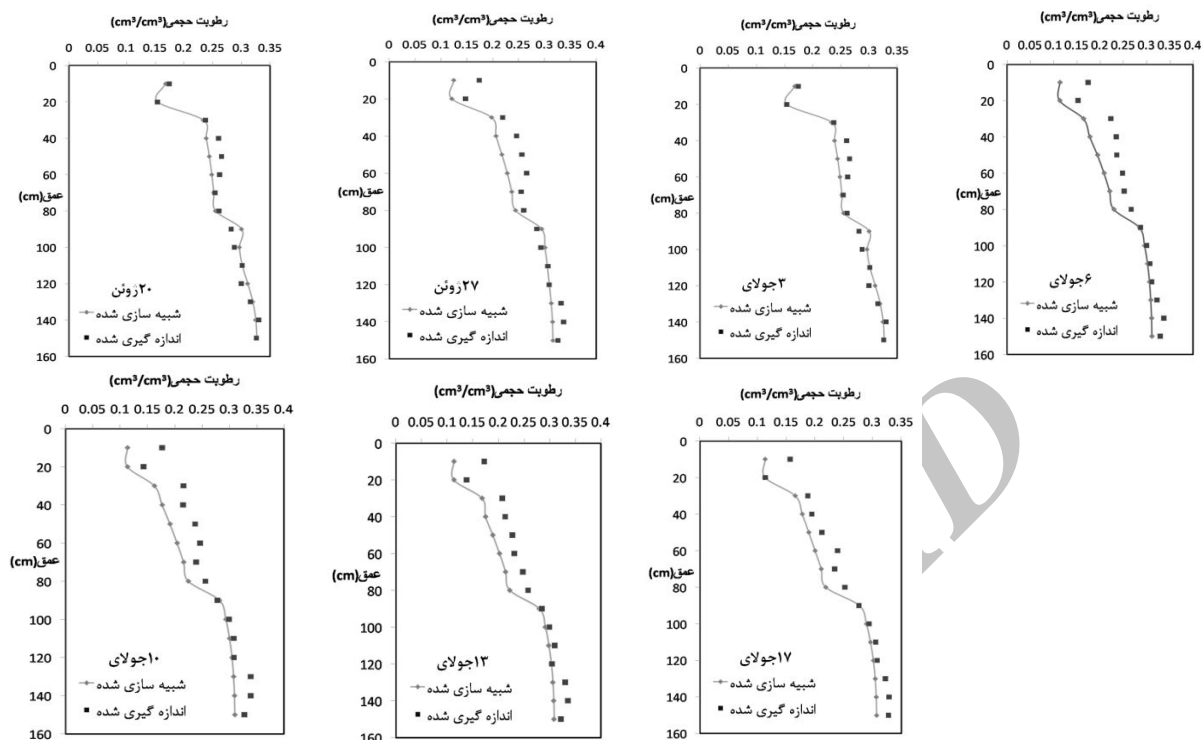
شکل ۵- مقایسه مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده در مرحله دوم کشت با خاکورزی با اعمال

خصوصیات هیدرولیکی روز ۲۰ ژوئن



شکل ۶- مقایسه مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده در مرحله سوم کشت با خاکورزی با

اعمال خصوصیات هیدرولیکی روز ۳ جولای



شکل ۷- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در کشت بی‌خاکورزی

جدول ۳- شاخص میانگین مربعات خطا (RMSE) بر حسب cm^3/cm^3

| شبه‌سازی | ۲۰ ژوئن | ۲۷ ژوئن | ۳ جولای | ۶ جولای | ۱۰ جولای | ۱۳ جولای | ۱۷ جولای |
|------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| مرحله اول | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۶۱ |
| مرحله دوم | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۴۲ |
| مرحله سوم | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۲۲ |
| بی‌خاکورزی | ۰/۰۱۱ | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۳۰ | ۰/۰۲۳ |

جدول ۴- شاخص ارزیابی کارایی مدل (EF) بر حسب درصد

| شبه‌سازی | ۲۰ ژوئن | ۲۷ ژوئن | ۳ جولای | ۶ جولای | ۱۰ جولای | ۱۳ جولای | ۱۷ جولای |
|------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| مرحله اول | ۹۷ | ۷۳ | ۵۶ | ۵۵ | ۵۹ | ۶۴ | ۸ |
| مرحله دوم | ۹۷ | ۷۲ | ۵۸ | ۵۶ | ۷۱ | ۷۷ | ۵۷ |
| مرحله سوم | ۹۷ | ۷۲ | ۵۸ | ۹۴ | ۹۵ | ۸۹ | ۸۸ |
| بی‌خاکورزی | ۹۶ | ۸۱ | ۶۰ | ۶۱ | ۶۷ | ۷۵ | ۸۸ |

نمی‌شود. از آنجا که پارامترهای مربوط به خاک؛ به‌عنوان ورودی نقش مهمی را در نتایج مدل دارند، مدل برای مزرعه تحت کشت بی‌خاکورزی عملکرد بهتری داشت.

اما در خاک بدون خاکورزی خلل و فرج‌های درشت طی بلند مدت ایجاد می‌شوند و لایه سطحی خاک سخت‌تر از خاک شخم خورده است و بنابراین پس از آبیاری تغییرات محسوسی در ساختمان خاک ایجاد

عملکرد بهتر مدل را با در نظر گرفتن تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان داد (اسکوئن و همکاران، ۲۰۱۱).

از آنجا که تغییرات در لایه سطحی هم به دلیل فشرده شدن ساختمان خاک پس از آبیاری و هم به دلیل تراکم ریشه بسیار زیاد است، مسلم است که اعمال تغییرات زمانی، عملکرد مدل را بهبود می بخشد. قابل ذکر است که اسکوئن و همکاران (۲۰۱۱) شبیه سازی مدل HYDRUS را برای شبیه سازی بدون اثر اعمال تغییرات زمانی نیز تأیید کردند.

نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، مقایسه شبیه سازی ها و بررسی عملکرد مدل HYDRUS-2D در دو سیستم کشت باخاکورزی و بی خاکورزی، در دو مزرعه تحت کشت گیاه ذرت بوده است که با تیپ، آبیاری می شد. با مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با آماره های EF و RMSE مشاهده شد که این مدل قادر است مقادیر رطوبتی را برای کشت بی خاکورزی به خوبی شبیه سازی کند و در کشت با خاکورزی نیز مشاهده شد که با اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک نتایج شبیه سازی بهبود یافت. نتایج این تحقیق نشان داد که می توان جهت مدیریت آبیاری و یا طراحی و انتخاب بهترین طرح در هر دو نوع سیستم کشت، از مدل HYDRUS-2D استفاده نمود، همچنین پیشنهاد می شود که تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک پس از اولین آبیاری در سیستم کشت باخاکورزی اعمال شود تا نتایج مطلوب تری حاصل شود.

مدل مقادیر رطوبت را در لایه های عمیق تر بهتر از لایه های سطحی تخمین زده است. علت این امر را می توان ناشی از تغییرات بیشتر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک در لایه های سطحی، به دلیل وجود ریشه گیاهان، تماس با هوا و تجمع بیشتر میکروارگانیسم ها در این لایه دانست. در بیشتر موارد در لایه های سطحی، مدل مقادیر رطوبت کمتری را نسبت به مقدار اندازه گیری شده برآورد نموده است هر چند که این تفاوت ها براساس آماره های مورد استفاده قابل ملاحظه نبوده اند. از دلایل محتمل تخمین کم مدل، می توان به خطای دستگاه نوترون متر در لایه های سطحی (خالدیان و همکاران، ۲۰۰۹) و استفاده از اطلاعات موجود در نرم افزار HYDRUS-2D برای گیاه ذرت در مدل Feddes اشاره نمود. البته قابل ذکر است که در کشت باخاکورزی با اعمال تغییرات زمانی خصوصیات هیدرولیکی خاک اختلافات رطوبت شبیه سازی شده و اندازه گیری شده در لایه های سطحی کاهش می یابد و نشان دهنده تأثیر خصوصیات هیدرولیکی خاک در شبیه سازی است.

تحقیقات بسیار کمی در زمینه اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک و مقایسه سیستم های کشت مختلف در شبیه سازی با مدل HYDRUS-2D صورت گرفته است. در یک مورد تحقیق در استرالیا طی سه تیمار کشت سنتی با کاربرد شخم، کم خاکورزی و بی خاکورزی، حرکت آب در خاک با اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک و بدون اعمال آن در خاک سیلنتی لوم، طی دو فصل بهار و تابستان، برای لایه سطحی خاک (تا عمق ۳۰ سانتی متری) با نرم افزار HYDRUS شبیه سازی شد و نتایج، برای هر سه تیمار

فهرست منابع

۱. عباسی، ف. و تاجیک، ف. ۱۳۸۶. برآورد هم‌زمان پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک به روش حل معکوس در مقیاس مزرعه‌ای. مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. سال یازدهم. شماره اول (الف): ۱۱۱-۱۲۲.
۲. کندلوس، م. لیاقت، ع.م. و عباسی، ف. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D. دومین کارگاه فنی خرد آبیاری. مؤسسه آب و خاک کرج. ۲ آذر ماه ۱۳۸۵.
۳. اژدری، خ. ۱۳۹۱. مدلسازی بهینه مصرف آب آبیاری در مزرعه. اولین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه. کرج. ۹ و ۱۰ خرداد.
4. Amin, M. S. M and A. I. M. Ekhmaj. 2006. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. 7th International micro irrigation congress, Sept. 10–16. PWTC, Kuala Lumpur, Malaysia.
5. Boivin, A., J. Simunek, M. Schiavon and M. Th. van Genuchten. 2006. Comparison of pesticide transport processes in three tile-drained field soils using HYDRUS-2D. Vadose Zone Journal. 5:838-849.
6. Cook, F. J., P. J. Thorburn, P. Fitch and K.L. Bristow. 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. Irrigation Science. 22: 129-134.
7. Feddes R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Wiley, New York.
8. Hubbard R. K., R. R. Lowrance and R.G. Williams. 2001. Preferential flow in clayey Coastal Plain soil as affected by tillage. ASAE: 261–262.
9. Kandelous M. M., A. Liaghat. and F. Abbasi. 2008. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. Journal of Agriculture Science, 39(2): 371–378.
10. Kandelous, M. M. and J. Simunek. 2010a. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. Irrigation Science. 28: 435-444.
11. Kandelous, M. M. and J. simunek. 2010b. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS- 2D. Agricultural Water Management. 97: 1070-1076.
12. Khaledian, M., J. C. Mailhol. P. Ruelle and P. Rosique. 2009. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system: the case of corn and durum wheat in a Mediterranean context. Agriculture Water Management. 96(5): 757-770.
13. Lampurlanes, J. and C. Cantero-Martinez. 2006. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. Soil and Tillage Research. 85(1-2): 13-26.
14. Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, J. M. Soria Ugalde, R. Cuenca, I. Braud and R. Haverkamp. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST. Soil Science Society America Journal. 70, P. 521–532.
15. Liga M. and D. Slack. 2004. A design model for subsurface drip irrigation in Arizona. Department of Agriculture Biosystem Arizona.
16. Lipiec J., J. Kus, A. Slowinska-Jurkiewicz and A. Nosalewicz. 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. Soil and Tillage Research. 89 P: 210-220.
17. Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research. 12: 513–522.

- 18 Mubarak, I. 2008. Effect of Temporal Variability in Soil Hydraulic Properties on Simulated Water Transfer under High-Frequency Drip Irrigation. Ph.D thesis. Montpellier II university. 200 p.
- 19 Mubarak I., J. C. Mailhol, R. Angulo-Jaramillo, P. Ruelle, P. Boivin and M. Khaledian. 2009. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. *Geoderma* 150:158-165.
- 20 Muller, A. 2001. Estimation of hydraulic soil parameters of tilled soil using direct and inverse methods. MSc thesis. Cemagref. 28p.
- 21 Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10:282–290.
- 22 Patel, N. and T. B. S. Rajput. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural Water Management*. 95(12): 1335-1349.
- 23 Sasal, M. C., A. E. Andriulo and M. A. Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 9-18.
- 24 Schwartzman, M. and B. Zur. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 112: 242-253.
- 25 Schwen, A., G. Bodner, W. Loiskandl. 2011. Time-variable soil hydraulic properties in near-surface soil water simulations for different tillage methods. *Agriculture Water Management*. 99: 42-50.
- 26 Simunek, J., M. Sejna and M.Th. van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. IGWMC-TPS 53, Version 2.0, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colo.
- 27 Siyal, A. A. and T. H. Skaggs. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management* 96: 669–677.
- 28 Skaggs, T. H., T. J. Trout, J. Simunek and P. J. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130(4): 304–310.