

## بهبود کارایی مدل HYDRUS-2D در اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک

هدیه پوریزدانخواه<sup>۱</sup> - محمدرضا خالدیان<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۷/۲

### چکیده

در دهه‌های اخیر به دلیل کمبود منابع آب، استفاده از آبیاری قطره‌ای رواج یافته است. با توجه به این که طراحی و نصب سیستم آبیاری زمان‌بر و هزینه‌بردار است، طراحی باید به گونه‌ای باشد تا سیستم بتواند آب مورد نیاز گیاه را تأمین کند. امروزه مدل‌هایی وجود دارند که می‌توانند رطوبت خاک را بر اساس شرایط مختلف شبیه‌سازی کنند. در این تحقیق عملکرد مدل HYDRUS-2D با اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد بررسی قرار گرفت. منطقه‌ای در جنوب فرانسه، تحت کشت ذرت و تحت آبیاری با نوارهای قطره‌ای در نظر گرفته شد، و رطوبت خاک توسط یک نوترون متر در هر ۱۰ سانتی‌متر از خاک و تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری گردید و با رطوبت‌های شبیه‌سازی شده با مدل، توسط آماره‌های ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب کارایی مدل (EF) مقایسه شد. با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی خاک، مقادیر RMSE از  $0.061 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$  به  $0.022 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$  کاهش و ضریب کارایی مدل از ۸٪ به ۸۸٪ افزایش یافت. معنی‌دار بودن این اختلافات با نرم‌افزار SPSS سنجیده شد. نتایج نشان داد که تغییرات پارامترهای هیدرولیکی خاک در اولین آبیاری بسیار محسوس بود. این تحقیق نشان داد که مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی رطوبت اعماق مختلف خاک، عملکرد خوبی دارد. پیشنهاد می‌شود قبل از طراحی سیستم یا اجرای مدیریت آبیاری، کارایی سیستم با این مدل سنجیده شود و بهترین طرح و راهبری سیستم انتخاب گردد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای نواری، پارامترهای هیدرولیکی خاک، HYDRUS-2D

### مقدمه

دارند که می‌توانند با در نظر گرفتن تمامی شرایط، میزان رطوبت خاک را در مکان‌های مختلف توسعه ریشه برآورد کنند. با تأیید کارایی مدل در شرایط مورد نظر، می‌توان قبل از نصب سیستم آبیاری، طرح‌های مختلف را سنجید و بهترین طرح را جهت اجرا در نظر گرفت. چنانچه سیستم اجرا شده باشد، جهت بهبود عملکرد سیستم، می‌توان با کمک گرفتن از مدل، راهکارهای مدیریتی مناسبی را پیشنهاد داد (۶).

مدل‌های مختلفی وجود دارند که با توجه به کاربردهایشان در مدیریت آبیاری استفاده می‌شوند، این مدل‌ها به سه دسته‌ی حل عددی، حل تحلیلی و معادلات تجربی تقسیم می‌شوند. مدل‌های رایجی که امروزه استفاده می‌شوند WetUp (۷)، HYDRUS-2D (۲۳)، زور (۲۷) و میرزائی (۵) هستند که قابلیت‌های منحصر به فردی دارند. مدل WetUp بر پایه‌ی حل تحلیلی معادله فیلپ است و قادر است محیط خیس شدگی و مرز جبهه رطوبتی را تعیین کند، مدل زور، مدل تجربی است که ابتدا توسط شوارترزمن و زور ارائه شد (۲۱) که در سال ۱۹۹۶ اصلاحاتی توسط زور روی آن انجام گرفت و نسخه‌ی کامل‌تر آن با عنوان مدل زور رواج یافت. مدل‌های زور و میرزائی قادر به محاسبه محیط خیس شده‌ی خاک و قطر دایره‌ی خیس شده

اکثر مناطق ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشند و به دلیل کمبود آب به‌ویژه در سال‌های اخیر، مصرف بهینه آن در کشاورزی نقش بسیار مهمی پیدا کرده است. آبیاری قطره‌ای به دلیل راندمان بالای آن، بسیار رواج یافته است. از آن‌جا که پیاز رطوبتی ایجاد شده باید کل منطقه توسعه ریشه را پوشش دهد، می‌توان گفت ابعاد پیاز رطوبتی و توزیع رطوبت حاصل از آن، دو عامل مهم در تعیین عمق نصب و فواصل بین قطره‌چکان‌ها، جهت دستیابی به توزیع بهینه آب و کود در منطقه توسعه ریشه است (۱۱). از آنجا که طراحی و نصب سیستم آبیاری هزینه‌بردار و زمان‌بر است، طراحی باید به گونه‌ای باشد تا رطوبت مورد نیاز گیاه در کل دوره‌ی رشد تأمین شود. در طراحی سیستم آبیاری نوع خاک، نوع گیاه، اقلیم منطقه و برنامه‌ریزی آبیاری باید در نظر گرفته شود. امروزه، مدل‌هایی وجود

۱ و ۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

(Email: khaledian@guilan.ac.ir)

(\* - نویسنده مسئول)

(N ۴۰' ۴۳° و E ۵۰' ۳۰°)، خاک سطحی شخم خورد و در ۲۴ آوریل سال ۲۰۰۷، گیاه ذرت با فواصل ردیفی ۰/۷۵ متر از یکدیگر کشت شد. در دو ماه اول فصل زراعی به دلیل بارندگی‌های بهاره در منطقه، نیاز به آبیاری نبود و در ابتدای ماه ژوئن، نوارهای آبیاری قطره‌ای که فواصل قطره‌چکان‌های آن از هم ۳۰ سانتی‌متر بود یکی در میان در بین ردیف‌های گیاهی قرار داده شدند یعنی به ازای هر دو ردیف کشت، یک ردیف نوار آبیاری قطره‌ای مستقر شد، بنابراین فواصل بین لاترال‌ها ۱/۵ متر بود. دبی نوار آبیاری قطره‌ای 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، آبیاری به مدت ۳ ساعت اعمال شد و در روزهای قبل و بعد از روزهای تعطیل (شنبه و یکشنبه) آبیاری تکمیلی انجام گردید. در روزهای ۱۸، ۲۰ و ۲۷ ژوئن و ۳، ۶، ۱۰، ۱۳ و ۱۷ جولای توسط نوترن متر مدل Troxler 503DR رطوبت خاک، در هر ۱۰ سانتی‌متر تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متر در بین دو گیاه و بر روی ردیف گیاهی قرائت شد.

از آن‌جا که فواصل بین قطره‌چکان‌ها خیلی کم است، نوارهای آبیاری قطره‌ای می‌تواند به عنوان یک منبع خطی مورد بررسی قرار گیرد، از این رو، می‌توان از یک بعد صرف‌نظر کرد و جریان را در دو بعد (z و x) بررسی نمود (۲۴). شبیه‌سازی جریان آب در خاک در مدل با استفاده از حل عددی معادله‌ی دو بعدی ریچاردز (معادله ۱) انجام می‌شود که با فرض خاک همروند و یکنواخت به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

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

که در آن،  $\theta$  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 ریشه‌ی گیاه است که بر اساس مدل فدس موجود در نرم‌افزار HYDRUS-2D محاسبه شد (۹).

نیمرخ عمودی خاک به صورت متقارن و دو بعدی در نظر گرفته شد. پروفیل شبیه‌سازی شده شامل یک نوار آبیاری و دو ردیف کشت است (شکل ۱). بعد افقی حوزه ۱/۵ متر، برابر با فواصل بین نوارهای آبیاری و بعد عمودی آن نیز ۱/۵ متر فرض شد که ستون خاک اندازه‌گیری شده را شامل می‌شود. جریان آب لاترال در طول مرز صفر فرض شد و مرز زیرین به عنوان مرز زهکش آزاد برای مدل تعریف گردید. شاخص سطح برگ با LAImeter مدل LiCor2000 در مراحل مختلف رشد گیاه اندازه‌گیری شد، در این مرحله از رشد گیاه شاخص سطح برگ بیش از ۲/۵ بود که به دلیل گستردگی سطح برگ و سایه‌اندازی آن مقدار تبخیر بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است (۱۲). بنابراین، تبخیر و تعرق برابر با تعرق گیاه فرض شد و از تبخیر

توسط خروجی‌های نقطه‌ای و خطی در خاک‌های مختلف هستند. اشمیز و همکاران (۲۰) یکی از راه‌های مؤثر برای بهینه کردن برنامه‌ریزی آبیاری را استفاده از حل عددی معادلات جریان برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک دانسته‌اند.

مدل HYDRUS-2D بسته نرم‌افزاری تحت سیستم‌عامل ویندوز است که با تجزیه و تحلیل جریان آب، انتقال املاح و گرما در شرایط دو بعدی قادر به شبیه‌سازی در شرایط اشباع و غیراشباع در حالت افقی، عمودی و شعاعی است. این مدل بر پایه‌ی حل عددی معادلات فیزیکی حاکم بر جریان است و علاوه بر تعیین نحوه‌ی توزیع رطوبت در خاک، قادر به مشخص کردن مقادیر رطوبت در منطقه‌ی شبیه‌سازی شده است. بسیاری از مطالعات عملکرد این مدل را برای شرایط تحت آزمایش، با مقایسه داده‌های صحرایی و شبیه‌سازی شده تأیید کرده‌اند.

در تحقیقی، نحوه توزیع رطوبت به‌صورت عمودی و افقی در ناحیه ریشه گیاه ترب و مقدار آبشویی عمقی از طریق شبیه‌سازی محیط ناحیه‌ی ریشه با استفاده از مدل HYDRUS-2D مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد که این مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی دارد و می‌توان با انتخاب دور مناسب آبیاری و دبی مناسب قطره‌چکان، رطوبت لازم برای گیاه را در حد مطلوب نگه داشت (۱). تحقیقی در سطح مزرعه در کالیفرنیا انجام شد که در طی سه زمان آبیاری، بر روی یک نمونه بافت خاک نسبتاً سبک، توسط لوله‌هایی که به فواصل مساوی قطره‌چکان‌هایی روی آن تعبیه شده بود، آبیاری صورت گرفت و با مقایسه‌ی نتایج مشاهده شده با نتایج حاصل از مدل، کارایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی تأیید شد (۲۴). سیال و اسکگز (۲۵)، کارایی این مدل را برای شبیه‌سازی الگوی پیاز رطوبتی تحت آبیاری با نوارهای آبیاری قطره‌ای در خاک‌های متوسط و سبک تأیید نموده‌اند. بسیاری از تحقیقات نیز کارایی این مدل را در شبیه‌سازی شکل توزیع رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به تأیید رسانده‌اند (۴، ۸ و ۱۴).

از آن‌جا که طی تحقیقاتی ثابت شده است که پارامترهای هیدرولیکی خاک و متعاقباً منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک در آبیاری اول به دلیل فشرده شدن لایه‌های خاک به‌طور محسوسی تغییر می‌کند (۱۶)، در این تحقیق سعی شده است تا علاوه بر در نظر گرفتن جذب ریشه گیاه ذرت، خاک لایه‌لایه و آبیاری یک در میان ردیف‌های گیاهی، تأثیر تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک در شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D بررسی شود و نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن این تغییرات و بدون در نظر گرفتن آن سنجیده شوند.

## مواد و روش‌ها

در مزرعه‌ای واقع در ایستگاه تحقیقاتی ایرستیا، در جنوب فرانسه

صرف نظر شد. جهت برآورد میزان تعرق گیاه، از مدل پایلوت (۱۲) که در سایت تحقیقاتی لاوالت برای گیاه ذرت واسنجی و اعتبارسنجی شده است استفاده گردید.

در هنگام آبیاری، منبع خطی در هر نقطه، جریان ثابتی برابر با  $q$  دارد که مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید که شعاع نوار آبیاری قطره‌ای در حین آبیاری ۱ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد.

$$q = \frac{\pi r^2 \rho_w \cdot m^3 \cdot h^{-1}}{\pi m \cdot (\rho_w m) (\rho_w m)} = 0.004 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$$

پارامترها بر اساس مدل ون گنوختن برآورد گردیدند. برای تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از معادله‌ی ون گنوختن - معلم برای  $\theta(h)$  (معادله ۲) و  $K(\theta)$  (معادله ۳) استفاده شد (۱۵).

در هر دوره از فصل رشد با حفر پروفیل، حداکثر عمق ریشه اندازه‌گیری شد. مشاهدات نشان دادند که سیستم ریشه ذرت در ماه آوریل مستقر شد و در نیمه‌ی اول ماه جولای به بیشترین حد رشد خود رسید. قبل از آبیاری، سیستم ریشه به طور طبیعی توسعه می‌یابد و فرض می‌شود که تقارن در زیر ساقه‌ی ذرت وجود دارد. پس از آبیاری، از آن‌جا که نوارهای آبیاری به صورت یکی در میان در بین ردیف‌های گیاهی قرار می‌گیرند، سیستم ریشه به سمت نوارهای آبیاری قطره‌ای متمایل می‌شوند (۱۷). جهت اعمال توسعه ریشه، رشد ریشه به دو مرحله تقسیم شده است. اولین مرحله، وجود تقارن ریشه برای دو هفته‌ی اول پس از اولین آبیاری اعمال شد و مرحله دوم برای شبیه‌سازی هفته دوم (۳ جولای) به بعد اعمال گردید (شکل ۲). الگوی توزیع جذب آب توسط ریشه نیز این طور فرض شد که ۴۰ درصد جذب آب در یک چهارم بالای ریشه صورت می‌گیرد و به ترتیب به ۳۰، ۲۰ و ۱۰ درصد کاهش می‌یابد (۳). بافت خاک تحت کشت لومی و شامل سه لایه بود که ویژگی‌های هیدرولیکی آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

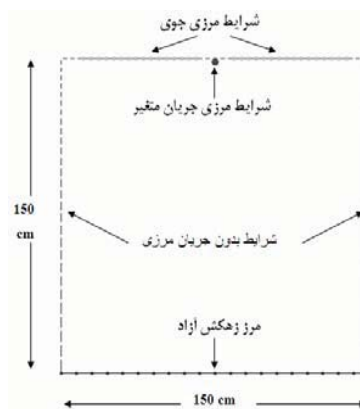
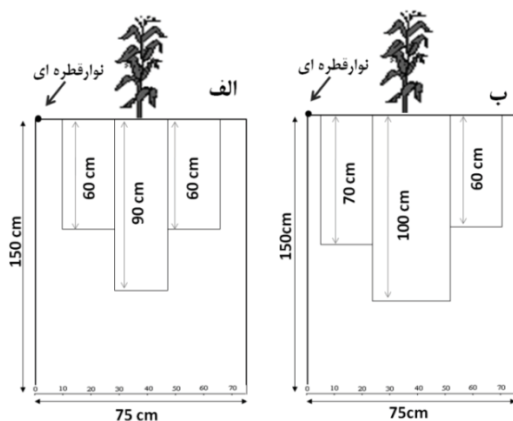
$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad \text{with } m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

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

که در آن،  $\alpha$  عکس مکش در نقطه ورود هوا در مدل ون گنوختن  $L^{-1}$  و  $l$  پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک است که ۰/۵ در نظر گرفته شده است؛  $m$  و  $n$  پارامترهای شکل منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک؛  $\theta_r$  و  $\theta_s$  به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و رطوبت حجمی باقیمانده در نقطه ورود هوا  $[L^3 L^{-3}]$  و  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشند  $[L T^{-1}]$ . برای تخمین پارامتر عکس مکش در نقطه ورود هوا در مدل ون گنوختن ( $\alpha$ ) از مدل RETC استفاده گردید (۲۶).

به منظور بررسی اثر تغییرات زمانی، پارامترهای هیدرولیکی خاک در سه زمان قبل از اولین آبیاری، یک روز بعد از اولین آبیاری و دو هفته بعد از اولین آبیاری، برای لایه اول اندازه‌گیری شدند و رطوبت خاک 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 و شبیه‌سازی در سه مرحله به صورت زیر انجام شد:

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه اول با روش نفوذسنج بیرکن (۱۰ و ۱۳) و در لایه دوم و سوم خاک با روش استوانه‌های مضاعف اندازه‌گیری شد (۱۸). رطوبت اشباع از رابطه



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

مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در عمق زام؛  $\bar{I}(m)$  میانگین مقادیر رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد اعماق مورد نظر است. معنی‌دار بودن این اختلافات با تست  $T$  موجود در نرم افزار SPSS جهت مقایسات داده‌های جفت در سطح ۵٪ تعیین شد.

## نتایج و بحث

در جدول ۱، مشاهده می‌شود که با گذشت زمان و اعمال آبیاری رطوبت اشباع و ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در لایه سطحی خاک کاهش می‌یابد. بعد از اولین آبیاری، هدایت هیدرولیکی خاک به یک سوم مقدار آن در قبل از آبیاری کاهش یافت و همچنین مقدار رطوبت اشباع خاک  $5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  کمتر از مقدار آن در زمان قبل از اولین آبیاری بود ولی در طی دو هفته بعد از اولین آبیاری با وجود اینکه ۱۲ روز آبیاری صورت گرفت، شدت کاهش هدایت هیدرولیکی خاک کمتر از شدت کاهش پس از اولین آبیاری بود و رطوبت اشباع خاک در حد  $0.36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  باقی ماند که این امر نشان می‌دهد که آبیاری اول نقشی اساسی در تغییرات پارامترهای هیدرولیکی خاک ایفاء می‌کند.

در شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D این تغییرات در مراحل دوم و سوم در ورودی‌های مدل اعمال شد که نتایج شبیه‌سازی‌های حاصل از مدل در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری شده توسط نوترون‌متر در هر مرحله و در روزهای قرائت در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ آورده شده‌اند و برای هر نمودار شاخص‌های مذکور برآورد شدند. نتایج حاصل در جداول ۲ و ۳ قابل مشاهده است و نتایج حاصل از مدل SPSS در جدول ۴ آورده شده‌اند.

در شکل ۳ در نمودار روز ۲۰ ژوئن مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی شده با مدل با نتایج اندازه‌گیری شده با نوترون‌متر بسیار به هم نزدیک هستند در حالی که برای سایر روزها در شکل ۳ اختلافات زیادی در لایه اول خاک مشاهده می‌شود که در ادامه دلایل آن ارائه خواهد شد.

برای مرحله اول داده‌های اندازه‌گیری شده در روز ۱۸ ژوئن به عنوان ورودی 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 مرحله دوم، ابتدا داده‌های مربوط به ۱۸ ژوئن که با نوترون‌متر اندازه‌گیری شد، به عنوان ورودی به مدل داده شد و ۲ روز شبیه‌سازی تعریف گردید و مدل مقادیر رطوبتی را از ۱۹ تا ۲۰ ژوئن که با نوترون‌متر اندازه‌گیری شد، به عنوان ورودی به مدل داده شد و ۲۷ روز شبیه‌سازی تعریف شد و مدل مقادیر رطوبتی را برای روزهای ۲۱ ژوئن تا ۱۷ جولای شبیه‌سازی نمود. در مرحله سوم، ابتدا داده‌های مربوط به ۱۸ ژوئن که با نوترون‌متر اندازه‌گیری شد، به عنوان ورودی به مدل داده شد و ۲ روز شبیه‌سازی تعریف گردید و مدل مقادیر رطوبت را برای روزهای ۱۹ تا ۲۰ ژوئن شبیه‌سازی نمود و سپس داده‌های مربوط به ۲۰ ژوئن که با نوترون‌متر اندازه‌گیری شد، به عنوان ورودی به مدل داده شد و ۱۳ روز شبیه‌سازی تعریف شد که مدل مقادیر روزهای ۲۱ ژوئن تا ۳ جولای را شبیه‌سازی نمود، سپس مقادیر رطوبت حاصل از نوترون‌متر در روز ۳ جولای وارد مدل شد و ۱۴ روز شبیه‌سازی برای آن در نظر گرفته شد که مدل مقادیر رطوبتی را برای ۴ تا ۱۷ جولای شبیه‌سازی نمود.

بعد از شبیه‌سازی، مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در روزهایی که با نوترون‌متر قرائت صورت گرفته بود با یکدیگر مقایسه شدند. 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 نوترون‌متر مقایسه و نتایج با آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا RMSE (معادله ۴) و ضریب کارایی مدل EF بر اساس معادله ۵ (۱۹) سنجیده شدند.

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

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

که در آن،  $I(p)$  مقدار رطوبت شبیه‌سازی شده در عمق زام؛  $I(m)$

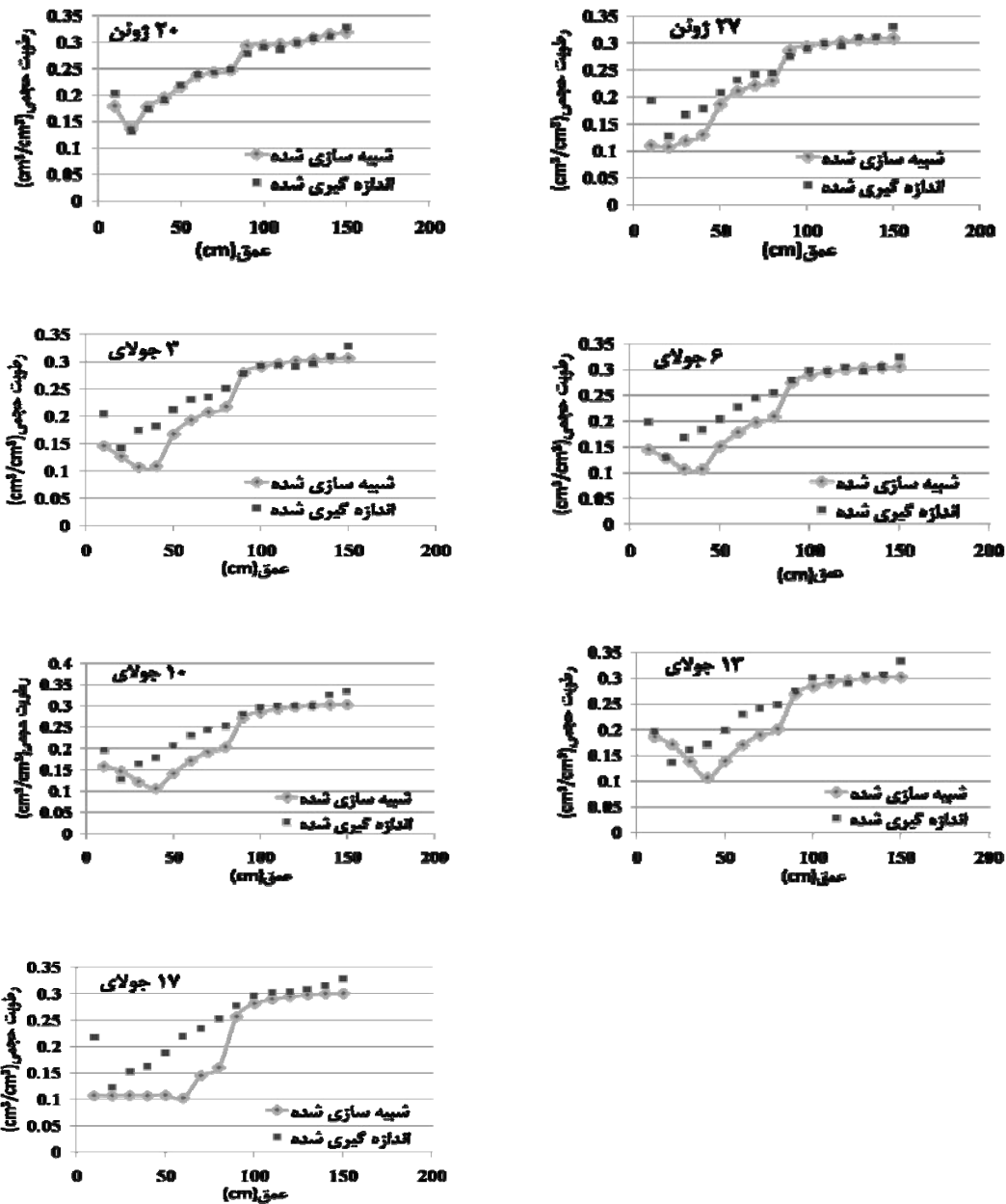
جدول ۱- ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و پارامترهای معادله ون گنوختن-معلم

I (-)	$K_s (\text{m hr}^{-1})$	n_Mualem (-)	$\alpha (\text{m}^{-1})$	$\theta_s (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\theta_r (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	
۰/۵	$1.0 \times 3/22$	۱/۲۱۷۵	۶/۲۲۱	۰/۴۱	.	۱*
۰/۵	$1.0 \times 1/13$	۱/۲۲۷۴	۴/۳۶۲	۰/۳۶	.	۲* (لایه اول (۵۵ - cm))
۰/۵	$1.0 \times 7/34$	۱/۲۲۶۷	۲/۷۲۷	۰/۳۶	.	۳*
۰/۵	$1.0 \times 5/10$	۱/۴۴۷	۱/۳	۰/۳۸	۰/۰۵	لایه دوم (۵۵ - ۹۰ cm)
۰/۵	$1.0 \times 2/58$	۱/۳۱	۱/۹	۰/۴۱	۰/۰۹۵	لایه سوم (۹۰ - ۱۵۰ cm)

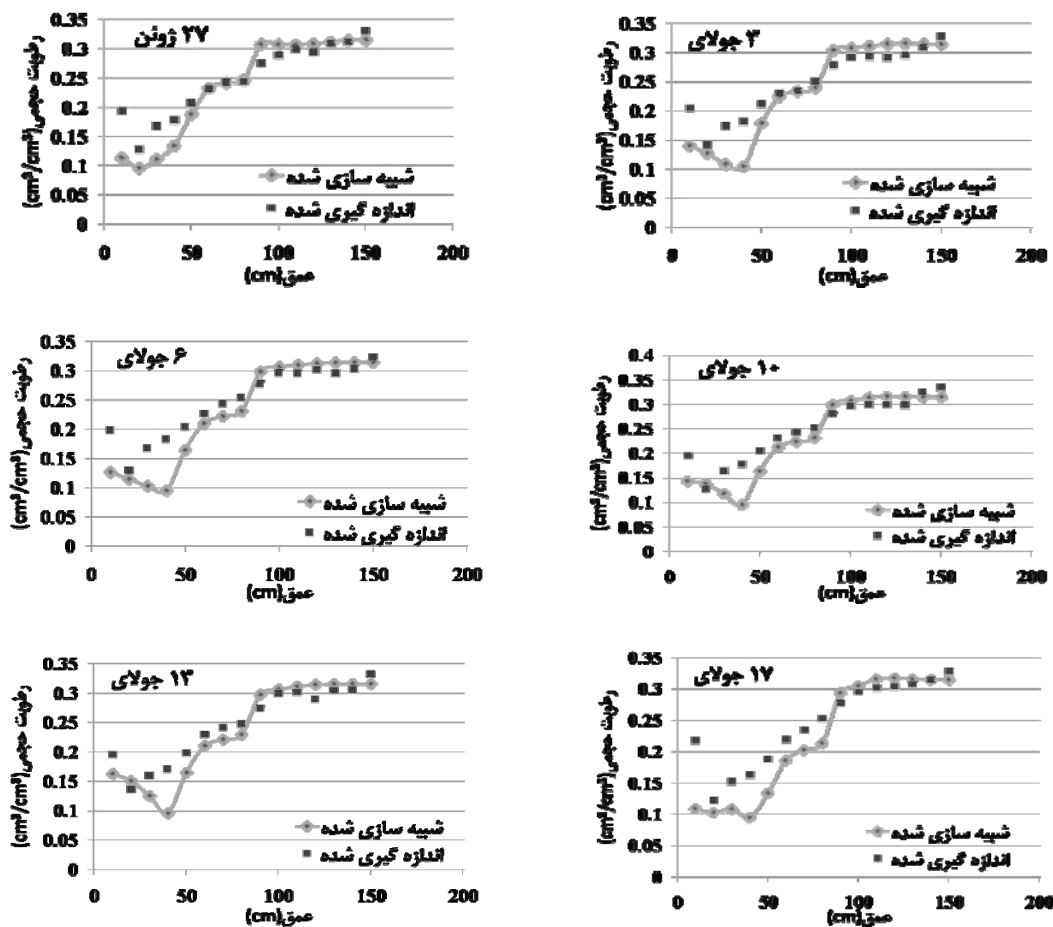
\*۱- ویژگی‌های هیدرولیکی خاک قبل از اولین آبیاری، ۲- ویژگی‌های هیدرولیکی خاک یک روز بعد از اولین آبیاری، ۳- ویژگی‌های هیدرولیکی خاک دو هفته بعد از اولین آبیاری

نشان می‌دهد که برای روزهای ۲۷ ژوئن تا ۱۳ جولای بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و این نشان می‌دهد که با اعمال داده‌های ورودی یک روز بعد از اولین آبیاری، مدل توانسته است دوره‌ی شبیه‌سازی را نسبتاً خوب برآورد کند. فقط در روز ۱۷ جولای این تغییرات معنی‌دار شدند که با اعمال داده‌های ورودی روز ۳ جولای، ضریب کارایی مدل در روز ۱۷ جولای به ۸۸ درصد افزایش یافت، هم‌چنین اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در این روز معنی‌دار برآورد نشد.

نتایج جداول ۲، ۳ و ۴ نیز این مورد را برای مرحله اول تأیید می‌کنند. در شکل ۴، مشاهده می‌شود که با اعمال داده‌های ورودی مربوط به ۲۰ ژوئن (یک روز پس از آبیاری)، نمودار رطوبت شبیه‌سازی شده به نقاط اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌شوند و نتایج ضریب کارایی مدل در انتهای دوره‌ی شبیه‌سازی افزایش می‌یابد به طوری که در روز ۱۷ جولای ضریب کارایی مدل از ۸ درصد به ۵۷ درصد می‌رسد. نتایج sig. حاصل از آنالیز مقایسه‌ی میانگین برای داده‌های جفت در تست T موجود در نرم‌افزار SPSS در جدول ۴



شکل ۳- مقایسه رطوبت‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در مرحله اول

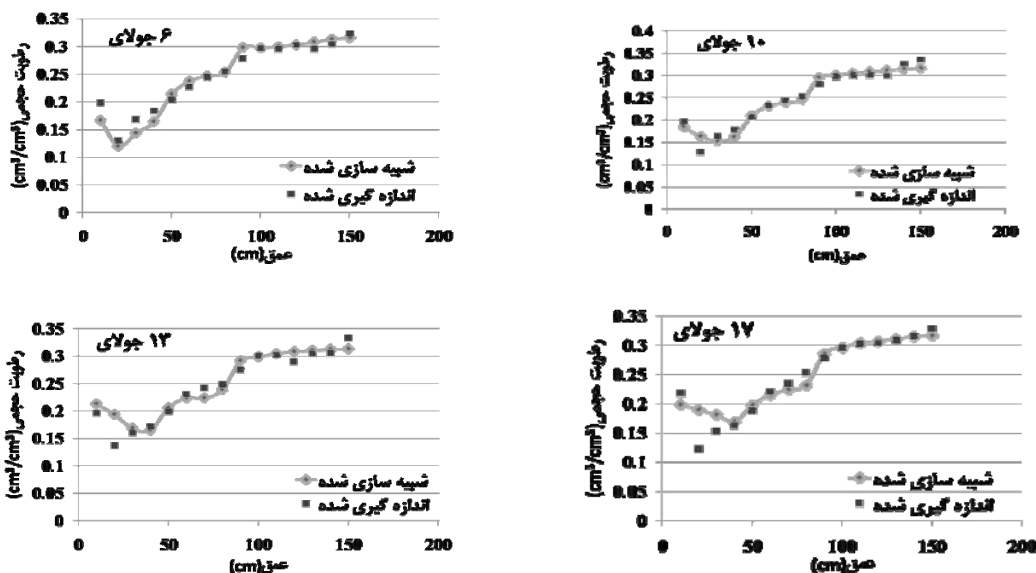


شکل ۴- مقایسه رطوبت‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در مرحله دوم، روز ۲۰ ژوئن مشابهی شکل ۴ است

شبیه‌سازی کل دوره‌ی ۲۹ روزه نیست. ولی در مراحل بعدی، با اعمال پارامترهای هیدرولیکی خاک، شبیه‌سازی مدل بهبود می‌یابد، به طوری که در مرحله‌ی سوم اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در کل دوره معنی‌دار نبود ( $0.05 <$ ) و این بدان معناست که مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شبیه‌اند و می‌توان نتیجه گرفت که مدل کارایی بالایی دارد مشروط بر اینکه داده‌های ورودی صحیحی به مدل اعمال شود. علت تغییرات در لایه سطحی را بدین صورت می‌توان توضیح داد که خاک قبل از کشت شخم زده شد که این امر باعث افزایش خلل و فرج خاک شد. در طی فشرده شدن، خلل و فرج کوچک خاک مسدود و خلل و فرج بزرگ آن، کوچک‌تر می‌شوند و این امر باعث می‌گردد که جریان عبوری کمتر و متعاقباً  $K_s$  نیز کمتر شود. این تغییرات اثر مشهودی را در شبیه‌سازی با مدل ایجاد می‌کند. اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در لایه‌ی سطحی خاک ( $0 - 40 \text{ cm}$ ) در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نیز مؤید این مطلب است.

در کل، جداول ۲ و ۳ نشان می‌دهند که با اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک یعنی تغییر ورودی‌های مدل براساس داده‌های برداشت شده بعد از آبیاری اول، مدل برآورد بهتری داشته است. بیشترین مقدار  $\text{RMSE}$   $0.061 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  است که مربوط به روز ۱۷ جولای در مرحله اول می‌باشد و با اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک در مرحله دوم به  $0.042 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  و در نهایت به  $0.022 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  کاهش و ضریب کارایی مدل از ۸ درصد به ۸۸ درصد افزایش یافت که نشان می‌دهد تغییرات پارامترهای هیدرولیکی خاک بعد از اولین آبیاری بسیار محسوس است و این به دلیل فشرده شدن لایه‌ی سطحی خاک و شکل‌گیری مجدد ساختمان خاک بعد از اولین آبیاری است.

نتایج جدول ۴ نیز نشان می‌دهند که برای مرحله اول (ردیف اول جدول ۴)، به جز روز ۲۰ ژوئن (با دارا بودن احتمال  $0.609$ )، در سایر روزها اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده معنی‌دار بوده است ( $0.05 >$ ) و این نشان‌دهنده‌ی این است که مدل با داده‌های مربوط به پارامترهای هیدرولیکی خاک در روز ۱۸ ژوئن قادر به



شکل ۵- مقایسه رطوبت‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در مرحله سوم؛ روزهای ۲۰ و ۲۷ ژوئن و ۳ جولای مشابهی شکل‌های ۴ و ۵ است

تحقیقات بسیار کمی در زمینه‌ی اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک در شبیه‌سازی با مدل HYDRUS صورت گرفته است.

هم‌چنین علت این امر را می‌توان علاوه بر شخم خوردن این لایه از سطح خاک، ناشی از تغییرات جوی مانند وقوع فاز تر و خشک شدن بر اثر دما و هم‌چنین رشد و توسعه‌ی ریشه در این ناحیه دانست.

جدول ۲- شاخص میانگین مربعات خطا برای مقادیر رطوبت بر حسب  $(RMSE) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

شبیبه‌سازی	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

جدول ۳- شاخص ارزیابی کارایی مدل (EF) برای پیش‌بینی مقادیر رطوبت خاک

شبیبه‌سازی	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%

جدول ۴- مقادیر sig. (احتمال) حاصل از آنالیز مقایسه‌ی میانگین در تست T موجود در نرم‌افزار SPSS جهت مشاهده‌ی معنی‌دار بودن اختلافات مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده

شبیبه‌سازی	۲۰ ژوئن	۲۷ ژوئن	۳ جولای	۶ جولای	۱۰ جولای	۱۳ جولای	۱۷ جولای
مرحله اول	۰/۶۰۹ <sup>n.s</sup>	۰/۰۱۳*	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۸**	**
مرحله دوم	n.s/۰/۶۰۹	۰/۲۰۱ <sup>n.s</sup>	۰/۲۰۳ <sup>n.s</sup>	۰/۰۷۵ <sup>n.s</sup>	۰/۰۸۷ <sup>n.s</sup>	۰/۱۵۶ <sup>n.s</sup>	۰/۰۲۶*
مرحله سوم	n.s/۰/۶۰۹	۰/۲۰۱ <sup>n.s</sup>	۰/۲۰۳ <sup>n.s</sup>	۰/۶۹۲ <sup>n.s</sup>	۰/۸۵۸ <sup>n.s</sup>	۰/۲۴۷ <sup>n.s</sup>	۰/۴۸۷ <sup>n.s</sup>

\* و \*\*: به ترتیب معنی‌دار بودن در سطوح ۵ و ۱ درصد و n.s: اختلاف معنی‌دار نیست

پارامترهای هیدرولیکی خاک در نظر گرفته شود.

### نتیجه گیری

هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک در شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D بوده است. در کل نتایج این تحقیق نشان داده است که در شبیه‌سازی با این مدل، لحاظ نمودن تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک نقش مهمی را در بهبود نتایج شبیه‌سازی ایفاء می‌کند، به‌خصوص این تغییرات بعد از اولین آبیاری بسیار مشهود است. این مدل می‌تواند مقادیر رطوبتی را حتی در خاک‌های لایه‌لایه و همچنین برای گیاهان با ریشه عمیق به خوبی شبیه‌سازی کند، بنابراین برای اعمال مدیریت‌های آبیاری بهتر است ابتدا نحوه حرکت آب در خاک و میزان رطوبت در پای گیاه با این مدل سنجیده شود و چنانچه در شبیه‌سازی تحت طراحی و یا اعمال مدیریت مورد نظر، سیستم بتواند میزان آب مورد نیاز گیاه را در زمان خاص تأمین کند، طرح و یا مدیریت موردنظر به مرحله‌ی اجرا برسد. همچنین پیشنهاد می‌شود تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک به‌خصوص بعد از اولین آبیاری در شبیه‌سازی اعمال شود.

در یک مورد تحقیقی در استرالیا، حرکت آب در خاک با اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک و بدون اعمال آن برای گیاه گندم در سه نوع کشت شخم خورده با گاوآهن برگردان‌دار، کم‌خاکورزی و بی‌خاکورزی با مدل HYDRUS شبیه‌سازی شد و برای هر سه روش، اعمال تغییرات زمانی نتایج مدل را بهبود بخشیده است (۲۲).

از آنجا که طراحی و مدیریت آبیاری بر اساس نیاز گیاه و نوع خاک منطقه صورت می‌گیرد، در نظر گرفتن تغییرات زمانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک دارای اهمیت است و با توجه به اینکه در سامانه‌های آبیاری تحت فشار امکان دستیابی به بازده مطلوب مصرف کود و نیز کارایی مصرف آب قابل پیش‌بینی است، استفاده از مدل‌های ریاضی مناسب، می‌تواند در مدیریت آبیاری برای افزایش کارایی مصرف آب و کود و همچنین بهینه‌سازی مصرف کود به‌منظور کاهش و جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی مفید واقع شود (۲). با توجه به این تحقیق و عملکرد خوب مدل، پیشنهاد می‌شود قبل از اعمال طراحی و یا مدیریت آبیاری مواردی مانند تعیین دبی آبیاری، تعیین فواصل بین نوارهای آبیاری و برنامه‌ریزی زمانی آبیاری با استفاده از این مدل سنجیده شود و بهترین راهبردی سیستم برای منطقه و گیاه مورد نظر انتخاب شود. همچنین باید در طراحی‌ها، اثر تغییرات زمانی

### منابع

- ۱- اژدری خ. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد پانزدهم، شماره اول. صفحه: ۱۸۰-۱۶۸.
- ۲- عباسی ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. ۲۵۰ صفحه.
- ۳- علیزاده ا. ۱۳۸۷. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۴۸۳ صفحه.
- ۴- 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. موسسه خاک و آب کرج. ۲ خرداد ۱۳۸۵.
- ۵- میرزایی ف. ۱۳۸۶. یک مدل ساده برای برآورد سطح خیس شده در آبیاری قطره‌ای با استفاده از تکنیک آنالیز ابعادی. سمینار علمی طرح ملی آبیاری تحت فشار و توسعه پایدار: ۳۰۵-۳۱۳.
- 6- Boivin A., Šimůnek J., Schiavon M., and Van Genuchten M.Th. 2006. Comparison of pesticide transport processes in three tile-drained field soils using HYDRUS-2D. *Vadose Zone Journal*, 5: 838-849.
- 7- Cook F.J., Thorburn P.J., Fitch P., and Bristow K.L. 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *Irrigation Science*. 22: 129-134.
- 8- Cote C.M., Birstow K.L., Charlesworth P.B., Cook F.J., and Thorburn P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*. 22: 143-156.
- 9- Feddes R.A., Kowalik P.J., and Zaradny H. 1978. *Simulation of field water use and crop yield*. Wiley, New York.
- 10- Haverkamp R., Arrue J.L., Vandervaere J.P., Braud I., Boulet G., Laurent J.P., Taha A., Ross P.J., and Angulo-Jaramillo R. 1996. Hydrological and thermal behavior of the vadose zone in the area of Barrax and Tomelloso (Spain): Experimental study, analysis and modeling Project. UN N° EV5C-CT 92 00 90.
- 11- Kandelous M.M., and Šimůnek J. 2010. 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., Mailhol J.C., Ruelle P., and Rosique P. 2009. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system: the case of corn and durum wheat in a Mediterranean context.



- Agricultural Water Management. 96(5): 757-770.
- 13- Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R., Soria Ugalde J.M., Cuenca R., Braud I., and Haverkamp, R. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST. *Soil Science Society of America Journal*. 70: 521-532.
  - 14- Liga M., and Slack D. 2004. A design model for subsurface drip irrigation in Arizona. Dep. Agri. Biosys. Arizona.
  - 15- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 12: 513-522.
  - 16- 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.
  - 17- Mubarak I., Mailhol J.C., Angulo-Jaramillo R., Ruelle P., Boivin P., and Khaledian M. 2009. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. *Geoderma* 150: 158-165.
  - 18- Muller A. 2001. Estimation of hydraulic soil parameters of tilled soil using direct and inverse methods. MSc thesis. Cemagref. 28p.
  - 19- Nash J.E., and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10:282-290.
  - 20- Schmitz G.H., Schutze N., and Petersohn U. 2002. New strategy for optimizing water application under trickle irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 128(5): 287-297.
  - 21- Schwartzman M., and Zur B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 112: 242-253.
  - 22- Schwen A., Bodner G., and Loiskandl W. 2011. Time-variable soil hydraulic properties in near-surface soil water simulations for different tillage methods. *Agricultural Water Management*. 99: 42-50.
  - 23- Šimůnek J., Šejna M., and Van Genuchten M.Th. 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.
  - 24- Skaggs T.H., Trout T.J., Šimůnek 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.
  - 25- Siyal A.A., and Skaggs T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management* 96: 669-677.
  - 26- van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., and Yates, S.R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Environmental Protection Agency, EPA/600/2-91/065.
  - 27- Zur B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science* 16(1996): 101-105.

## Improving Model Efficiency of HYDRUS-2D by Considering Temporal Variability in Soil Hydraulic Properties

H. Pouryazdankhah<sup>1</sup>- M.R. Khaledian<sup>2\*</sup>

Received:27-2-2012

Accepted:23-9-2012

### Abstract

In recent decades, using drip irrigation has been developed because of water resources deficiency. As irrigation system design and its installation is expensive and time consuming, so its designing should be in a way which the system can supply plant water requirement. Nowadays, there are models that can simulate the soil moisture, according to different conditions. In this study, the performance of HYDRUS-2D has been assessed, by considering temporal variability of soil hydraulic properties. In a field under corn crop and irrigated with tape in south of France, soil moisture at every 10 cm depth until 150 cm of soil measured by a neutron probe was compared to simulated moistures by model according to two statistic indices, i.e. Root Mean Square Error (RMSE) and efficiency factor (EF). By considering soil hydraulic properties variation, RMSE values reduced from 0.061 to 0.022 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> and efficiency factor of model increased from 8% to 88%. Significant effect of these differences has been evaluated by using SPSS software and the result showed that the variation of soil hydraulic parameters in first irrigation was considerable and HYDRUS-2D model has a good performance in simulating the soil moisture at different depths. It is suggested that before installing system or implement of irrigation management, the system performance was evaluated by this model, and the best system management and design would be chosen.

**Keywords:** HYDRUS-2D, Soil hydraulic properties, Tape

---

1,2- MSc Student and Assistant Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

(\*-Corresponding Author Email: khaledian@guilan.ac.ir)