توانایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

هرمزد نقوی[۱]، محدثه حسینی‌نیا[۲*]، شهرام کریمی گوغری[۳] و محسن ایراندوست[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۸/۱۴)

چکیده

آگاهی از نحوه توزیع آب در خاک جهت طراحی و مدیریت صحیح سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی امری ضروری است. از آنجایی که انجام آزمایش، برای تشخیص شکل توزیع رطوبت در داخل خاک بسیار سخت و وقت‌گیر می‌باشد، لذا استفاده از شبیه‌سازی عددی می‌تواند روشی مؤثر و کارا در امر طراحی این سیستم‌ها باشد. از جمله این مدل‌ها، مدل HYDRUS-2D است که قادر به شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در شرایط اشباع و غیراشباع در خاک می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی میزان توانایی مدل شبیه‌ساز HYDRUS -2D جهت تخمین توزیع رطوبت در خاک اطراف یک قطره چکان نقطه‌ای می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های به‌دست آمده از مزرعه شامل سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در زمان‌های مختلف از آبیاری و ۷۲ ساعت پس از آبیاری مقایسه شد. هم‌چنین مقادیر خطا برای تمامی نقاط و فواصل از قطره چکان و در تمامی زمان‌های آبیاری و پس از آن بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل توانسته روند تغییرات را مشابه آنچه که در پروفیل خاک رخ داده است شبیه‌سازی کند. البته میزان رطوبت خاک را در نقاطی که افزایش رطوبت در آنجا رخ داده است، با خطای بیشتری برآورد شده است، حداکثر مقدار خطا ۰/۰۵ =RMSE به ازای زمان ۱/۵ ساعت از شروع آبیاری در عمق ۳۰ سانتی‌متری در محل نصب قطره چکان. هم‌چنین با افزایش زمان آبیاری و یکنواخت شدن رطوبت خاک در اثر توزیع مجدد رطوبت، مدل برآوردهای بهتری ارائه کرد برآوردها با سپری شدن ۷۲ ساعت از اتمام آبیاری و میانگین خطای ۰/۰۰۲=RMSE به مقادیر واقعی نزدیک‌تر شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوی توزیع رطوبت، HYDRUS-2D، آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

۱. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.hosseinyniya@yahoo.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]

مقدمه

توسعه کشاورزی و تأمین غذا با وجود کمبود منابع آب تقریباً غیرممکن است. در این راستا جلوگیری از افت روز افزون سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش کیفیت آب، از مهم‌ترین اولویت‌های مدیریت کشاورزی می‌باشد. استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار و توسعه آنها در سال‌های اخیر تا حدودی توانسته است پاسخگوی این نیاز باشد. هم‌چنین جهت بالا بردن راندمان سیستم‌های آبیاری، سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به عنوان یک راهکار اساسی در بسیاری از مناطق ایران منجمله در استان کرمان که دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد توصیه می‌گردد. عدم وجود منابع آبی با کیفیت مناسب، افت روز افزون سطح آب‌های زیرزمینی و تبخیر بالا در این منطقه باغداران را مجبور به استفاده از سیستم‌های قطره‌ای زیرسطحی نموده است. بر این اساس نصب سیستم‌های قطره‌ای زیرسطحی و آگاهی از نحوهٔ طراحی صحیح آنها در رفع مشکلات موجود در کشاورزی منطقه (استفاده بهینه از منابع آبی و حذف فاکتور تبخیر (۳۰۰۰ میلی‌متر در سال)) پدیده‌ای نو خواهد بود. از سوی دیگر طراحی درست این سیستم نیاز به اطلاعات کافی از نحوه توزیع جریان آب در خاک به‌صورت افقی و عمودی دارد. این نوع اطلاعات در تعیین عمق نصب لاترال‌ها، فاصله آنها و اندازه قطره چکان‌ها مؤثر بوده و در چگونگی تنظیم شدت جریان خروجی از آن نقش مهمی ایفا می‌کند. هم‌چنین این نوع اطلاعات در به حداقل رساندن میزان نفوذ عمقی سیستم و تلفات تبخیر نیز تأثیرگذار می‌باشد(۱). به همین دلیل مدل‌های زیادی ارائه شده‌اند که با داشتن مشخصه‌های هیدرولیکی خاک، دبی خروجی و حجم آب خارج شده بتوانند تخمین قابل قبولی از شکل پیاز رطوبتی ارائه دهند(۵).

از این میان، مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های پیشرفته در ارتباط با حرکت آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد که توسط سیمونک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا بسط داده شده است(۴). در این راستا تحقیقات زیادی صورت گرفته است، کندلوس و سیمیونک (۱۰) دو آزمایش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تحت شرایط آزمایشگاه و مزرعه انجام دادند. آنها با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای هر دو درصدهای رطوبت خاک و ابعاد ناحیه خیس‌شده نشان دادند که دقت پیشگویی‌های HYDRUS–2D بسیار بالا بوده و می‌توان از آن به عنوان ابزاری مفید که قادر به بهینه کردن همه فاکتورهای اصلی در امر طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است، استفاده کرد. سییال و اسکگز (۱۳) به بررسی الگوی پخش آب ایجاد شده با لوله‌های سفالی به طول۲۰ متر و عمق۴۰ سانتی‌متر برای چهار ارتفاع فشار پرداختند. در مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه و شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار HYDRUS-2D با سه مقیاس آماری (R^2,ME,RMSE) نتایج مشابهی به‌دست آوردند که بیانگر کارایی خوب مدل در تخمین الگوی رطوبتی می‌باشد. المالوگلو و دیامانتوپولوس (۸) با مدل کردن آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقایسه نتایج حاصل از آن با مدل‌های تحلیلی و عددی (مدل HYDRUS-2D) دریافتند که روند تغییرات دبی بر الگوی رطوبتی و نفوذ عمقی تأثیرگذار است. اما بر مقادیر تبخیر و تعرق واقعی تأثیری ندارد. هم‌چنین تأثیر خصوصیات هیدرولیکی خاک می‌تواند بر هندسه خیس شده توسط قطره چکان تأثیرگذار باشد.

ترنتون و همکاران (۱۵) با به‌کارگیری دو سیستم آبیاری سطحی و زیرسطحی(نوع تیپ) و دو شوری مختلف برای آب آبیاری (۲/۶ d.S/m و۱/۵) به شبیه‌سازی تجمع املاح در خاک با مدل HYDRUS پرداختند. آنها عقیده دارند که تعیین الگوی انتقال و تجمع نمک‌ها در خاک قبل از کاربرد آب آبیاری برای گیاهان مختلف به‌خصوص در هنگام جوانه‌زنی امری ضروری است و مدل HYDRUS می‌تواند ابزاری مفید جهت تخمین این پارامترها باشد. کوک و همکاران (۷) جهت بررسی الگوی رطوبتی با استفاده از سه بافت خاک، دو نوع قطره چکان سطحی و زیرسطحی و دو راه حل عددی (HYDRUS-2D) و تحلیلی (روش فیلیپ) دریافتند که هر دو روش مذکور تخمین قابل قبولی از جبهه رطوبتی دادند. اما روش تحلیلی (ریول و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]

همکاران، ۱۹۹۷؛ فیلیپ، ۱۹۸۴) که با استفاده از فرضیات منبع نقطه‌ای و روش‌های قطعیت برای خواص فیزیک خاک پایه‌گذاری شده‌اند توانایی سریع‌تری جهت تصمیم‌گیری جبهه رطوبتی را خواهند داشت. در مقابل، روش‌های عددی با وجود فرضیات کمتر به محاسبات مهم و دقیق‌تری نیاز دارند. سینگ و همکاران (۱۲) در تحقیقشان از لوله‌های متخلخل و نوار تیپ جهت بررسی تغییرات الگوی رطوبتی در آبیاری زیرسطحی استفاده کردند. آنها میزان راندمان مدل HYDRUS-2D را در پیش‌بینی عرض و عمق خیس شدگی به‌ترتیب ۹۶/۴٪ و ۹۸/۴٪ اعلام کردند. در تحقیقاتی که توسط ملایی و همکاران (۴، ۵ و۶) و ترابی و صدرقائن (۲) به‌طور مجزا انجام پذیرفت به همبستگی بالای داده‌های اندازه‌گیری شده و اندازه‌های به‌دست آمده از روش‌های عددی (HYDRUS-2D)، روش‌های تحلیلی و تجربی (برای مثال شوارتزمن و زور) اشاره شده است. آنها نیز معتقدند که تعیین پیاز رطوبتی قبل از طراحی سیستم آبیاری زیرسطحی یکی از پارامترهای مهم جهت بهبود کارایی سیستم خواهد بود. اژدری (۱) نیز روی گیاه ترب با آبیاری قطره‌ای سطحی و مدل شبیه‌ساز HYDRUS-2D به نتایج مشابهی دست یافت. هدف از این تحقیق مقایسه شبیه‌سازی‌های HYDRUS-2D درمیزان نفوذ آب و توزیع مجدد رطوبت با داده‌های صحرایی و ارزیابی میزان سودمندی استفاده از شبیه‌سازی در عملیات طراحی و مدیریت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مزرعه آزمایشی

مطالعه نفوذ و توزیع مجدد آب در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مزرعه‌ای با مختصات جغرافیایی $30^{o}28$ شمالی و $57^{o}07$ شرقی واقع در جاده هفت باغ کرمان انجام شد. جهت انجام آزمایش، کانال‌هایی به طول ۱۰ متر و عمق ۳۰ سانتی‌متر جهت قراردادن لوله‌های حاوی قطره چکان زیرسطحی، خاکبرداری شدند. قطره چکان‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع داخل خط ساخت شرکت ایران دریپ با دبی ۲ لیتر در ساعت بود که به فواصل ۱ متری روی لوله فرعی ۱۶ میلی‌متری واقع شده‌اند. آزمایش برای زمان‌های ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ ساعت آبیاری و ۷۲ ساعت پس از اتمام آبیاری انجام پذیرفت. خاک منطقه مورد مطالعه شنی، شامل ۸۲/۳ درصد شن، ۷/۷ درصد سیلت و ۱۰ درصد رس بود. برای تعیین بافت خاک با حفر پروفیل از عمق‌های ۱۵-۰، ۳۰-۱۵، ۴۵-۳۰، ۶۰-۴۵، ۷۵-۶۰، ۱۰۵-۹۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری صورت گرفت. مقادیر درصدهای شن، سیلت و رس در تمام این لایه تقریباً یکسان بود و هیچ غیریکنواختی در لایه‌های خاک مشاهده نشد. مقدار میانگین ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب نیز به عنوان چگالی ظاهری خاک در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر رطوبت در حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی در دو مکش ۰/۳ و ۱۵ بار با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد که این مقادیر به همراه مشخصات فیزیکی خاک در جدول ۱ آمده است. جهت تعیین درصد رطوبت حجمی خاک از دستگاه بازتاب زمانی امواج (مدل ترایم- اف ام، عرضه شده توسط شرکت ایمیکو) و از طریق وارد کردن سنسور دستگاه داخل لوله‌های PVC با قطر مناسب که تا عمق ۱۰۵ سانتی‌متری خاک قرار داده شده بودند، پایش گردید(۹). این لوله‌ها به فواصل عرضی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر از لاترال‌ها در سه تکرار قرار داده شده بودند. با استفاده از لوله‌های استاندارد موجود و نمونه‌برداری از خاک و تعیین رطوبت حجمی در آزمایشگاه مطابق آزمایشات صورت گرفته توسط ستوده نیا و همکاران (۳)، قرائت رطوبت در لوله‌های PVC واسنجی گردید.

مدل‌سازی عددی

میزان نفوذ و پیشروی آب با استفاده از مدل HYDRUS–2D شبیه‌سازی شد. با فرض همگن و ایزوتروپ بودن خاک معادله حاکم بر جریان آب در حالت دو بعدی به‌صورت معادله ریچاردز خواهد بود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h)\right] \qquad [1]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه

عمق (سانتی‌متر)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	FC (درصد حجمی)	PWP (درصد حجمی)
۰–۱۵	۱۰	۸	۸۲	۱۳/۲	۶/۶
۱۵–۳۰	۱۰	۸	۸۲	۱۵/۷	۷
۳۰–۴۵	۱۰	۶	۸۴	۱۳/۹	۶/۵
۴۵–۶۰	۱۰	۶	۸۴	۱۵/۵	۶/۳
۶۰–۷۵	۱۰	۱۰	۸۰	۱۸/۱	۷/۲
۷۵–۹۰	۱۴	۶	۸۰	۱۷/۳	۷/۸
۹۰–۱۰۵	۶	۱۰	۸۴	۱۴/۱	۶/۵

که در آن، θ رطوبت حجمی ($l^3\ l^{-3}$)، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک(L) ، t زمان (T) ، x مختصات افقی (L) ، z مختصات عمودی(L) و k هدایت هیدرولیکی (LT^{-1}) می‌باشد. خصوصیات هیدرولیکی خاک با استفاده از روابط ترکیبی معلم- وان گنوختن محاسبه گرید:

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\dfrac{\theta_s-\theta_r}{\left(1+|\alpha h|^n\right)^m} & h<0\\ \theta_s & h\geq 0\end{cases} \qquad [2]$$

$$K(h)=K_s S_e\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \qquad [3]$$

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r},\quad m=1-1/n \qquad [4]$$

که در آن Se اشباع نسبی، θ_s رطوبت حجمی اشباع خاک، θ_r رطوبت باقی‌مانده در پروفیل خاک، K_s هدایت آبی اشباع و n و α پارامترهای تجربی می‌باشند HYDRUS–2D. از روش المان محدود گالرکین برای حل معادلات ۱ تا ۳ استفاده می‌کند. روش حل این معادلات توسط سیمیونک و همکاران در راهنمای تخصصی مدل آمده است(۱۱). دامنه انتقالی که برای مدل تعریف گردید، مستطیلی است با عرض ۶۰ سانتی‌متر و عمق ۱۵۰ سانتی‌متر به جز نیم‌دایره‌ای که در سمت چپ با شعاع یک سانتی‌متر به نمایندگی از قطره چکان در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از سطح واقع شده است. هم‌چنین با فرض این‌که الگوی رطوبت ایجاد شده در دو طرف قطره چکان متقارن است فقط سمت راست پروفیل شبیه‌سازی می‌شود. توزیع درصد رطوبت اولیه براساس درصد رطوبت نمونه‌ها قبل از انجام آبیاری، تخمین زده شد. بر این اساس، درصد حجمی رطوبت اولیه در جهت افقی یکنواخت و در جهت عمودی از θ = ۰/۰۴ در سطح خاک تا θ=۰/۱۲ در انتهای پروفیل خاک به‌صورت خطی برای مدل در نظر گرفته شد. در هنگام آبیاری، شرایط مرزی جریان متغییر برای قطره چکان استفاده شد که در پایان هر رویداد آبیاری، برای مرز لوله شرایط مرزی جریان صفر انتخاب شد. برای بقیه قسمت مرز چپ و مرزهای راست و پایین هم طی آبیاری و هم بعد از آبیاری از شرایط مرزی جریان صفر استفاده شد و از آنجایی‌که دامنه جریان محاسباتی به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده، مرزها روی جریان آب در دامنه تأثیری نمی‌گذارند. مرز پایینی نیز بیانگر زه‌کشی آزاد می‌باشد.

جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک در ابتدا از نرم‌افزار Rosetta استفاده شد. اما هدایت هیدرولیکی تخمین‌زده شده توسط Rosetta بسیار پایین بود($Ks=1/66\times10^{-5}$ m/s) که به HYDRUS اجازه نمی‌دهد توصیف خوبی از درصدهای رطوبت خاک طی آزمایش‌های نفوذ ارائه دهد. زیرا Rosetta فقط براساس خصوصیات بافت خاک محاسبات را انجام می‌دهد و نمی‌تواند تخمین خوبی از هدایت هیدرولیکی اشباع در شرایط خاک دست‌نخورده مزرعه به دست دهد که کندلوس

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]

و سیمونک (۱۰) نیز از همین روش جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک برای شرایط خاک دست‌نخورده مزرعه استفاده کردند. بنابراین از گزینه حل معکوس درHYDRUS-2D جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک استفاده شد. برای این منظور از درصدهای رطوبت که به‌صورت وزنی توسط مته نمونه‌برداری در فواصل و عمق‌های مختلف از قطره چکان واقع در عمق ۳۰ سانتی‌متری برداشت شد، جهت اجرای آنالیز معکوس استفاده شد. جدول ۲ مقادیر این پارامترها را در دو حالت تخمین زده شده توسط حل معکوس و Rosetta نشان می‌دهد.

ارزیابی آماری

میزان انطباق شبیه‌سازی‌های HYDRUS-2D با داده‌های اندازه‌گیری شده با پارامتر آماری خطای متوسط مجذور مربعات (RMSE) بیان شد. این پارامتر توسط ویل موت (۱۶) به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2}{N}} \qquad [5]$$

که در آن: N کل داده‌ها یا اطلاعات، P_i iامین نقطه داده شبیه‌سازی شده و O_i iامین داده مشاهداتی است. مقدار RMSE بر پراکندگی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل از داده‌های اندازه‌گیری شده دلالت دارد.

نتایج و بحث

شکل ۱ رطوبت حجمی پروفیل خاک را برای فواصل عرضی ۱۰،۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری از قطره چکان در زمان‌های ۱/۵، ۳، ۴/۵، ۶ و ۷۲ ساعت پس از آغاز آبیاری نمایش داده است. در این نمودار مقادیر رطوبت تخمین‌زده شده توسط مدل HYDRUS-2D نیز نشان داده شده است. نقاط پررنگ مقادیر تجربی و خط پیوسته مقادیر تخمین‌زده شده توسط مدل را نشان می‌دهند. در ساعات اولیه آزمایش، رطوبت خاک در منطقه نزدیک به قطره چکان (فاصله ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری) افزایش یافته و در سایر نقاط خاک میزان رطوبت تغییرات زیادی پیدا نکرده است (شکل۱). با گذشت زمان، رطوبت خاک به سمت عمق و در جهت افق (فاصله عرضی نسبت به قطره چکان) در کل پروفیل خاک توزیع شده (توزیع مجدد) و مقدار رطوبت خاک به نحوی تغییر کرده که در تمام نقاط پروفیل خاک مورد مطالعه، برابر باشد (شکل۱). نتایج برازش مدل HYDRUS-2D (در شرایط آزمایش) و تخمین رطوبت خاک در تمام نقاط مورد مطالعه و در زمان‌های آزمایش در شکل ۱ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل توانسته روند تغییرات را مشابه آنچه که در پروفیل خاک رخ داده است شبیه‌سازی کند. البته در همه زمان‌ها و در همه نقاط پروفیل خاک، دقت پیش‌بینی رطوبت خاک توسط مدل، نسبت به داده‌های تجربی یکسان نیست.

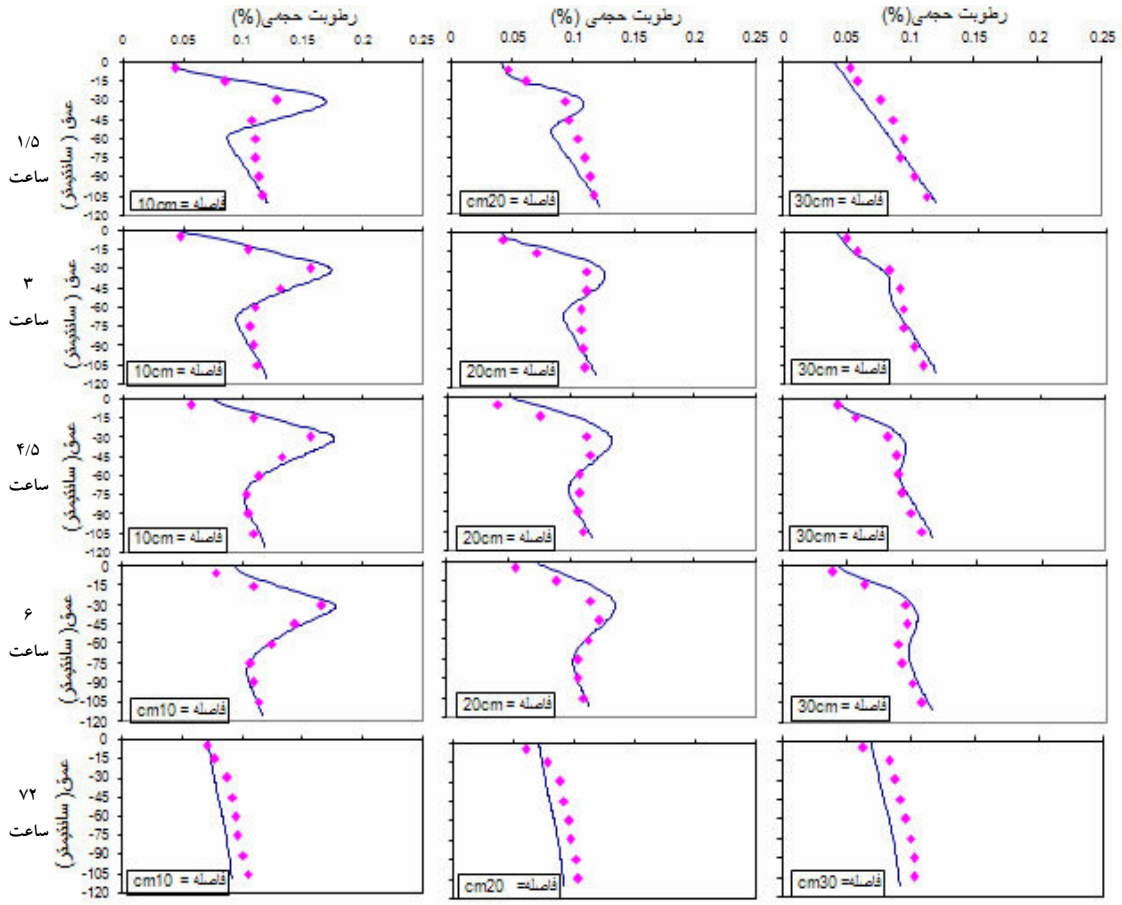
شکل‌های ۲ و ۳ میزان خطای تخمین مدل (RMSE) نسبت به مقادیر تجربی را در ساعات پس از آبیاری و برای عمق‌های مورد مطالعه نمایش داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد پس از ۱/۵ ساعت از آغاز آبیاری، میزان خطای نسبی محاسبه شده مدل (RMSE) در نقاط نزدیک قطره چکان (فاصله ۱۰ سانتی‌متری و عمق ۳۰ سانتی‌متر) بیشتر از فواصل و عمق‌های دیگر می‌باشد. در این زمان میزان رطوبت خاک نیز در این نقاط بیشتراست (شکل۲). میزان انحراف برازش مدل نسبت به مقادیر تجربی در عمق ۶۰ سانتی‌متر به ازای زمان ۱/۵ ساعت از آبیاری نیز قابل توجه است. میزان خطای مدل در این عمق (۶۰ سانتی‌متر) پس از توزیع رطوبت و در زمان‌های طولانی‌تر جبران و در اثر گسترش رطوبت به این عمق کاهش یافته است (شکل۲). میزان انحراف مقادیر تخمین‌زده شده توسط مدل برای زمان ۱/۵ ساعت پس از آبیاری و عمق‌های پائین‌تر از ۶۰ سانتی‌متر روندی نزولی داشته است (شکل۲). این نتایج نشان می‌دهد که مدل، رطوبت خاک را در عمق‌های پایین‌تر در زمان ۱/۵ ساعت پس از آبیاری بهتر تخمین‌زده است. در این اعماق میزان رطوبت خاک نسبت به عمق‌های بالا، کمتر است. به نظر می‌رسد مدل توانسته است در نقاطی که رطوبت خاک هنوز

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]

جدول ۲. پارامترهای هیدرولیکی تخمین‌زده شده توسط Inverse Solution , Rosetta

	Qr	Qs	Alpha	n	ks	L
Rosetta	۰/۰۳۱	۰/۳۳	۰/۰۴۵	۱/۳۷	۶	۰/۵
Inverse Solution	۰/۰۳۱	۰/۳	۰/۰۲۳	۲	۳۰	۰/۵

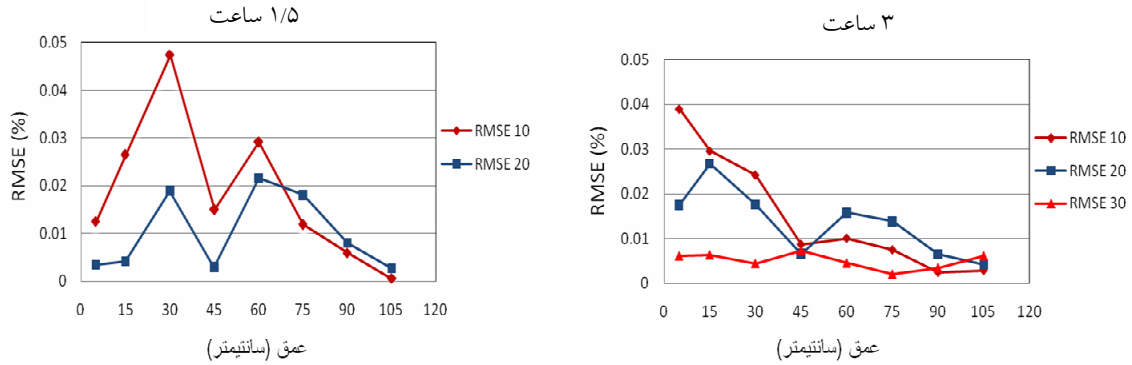


شکل ۱. مقایسه درصدهای رطوبت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در زمان‌های ۱/۵ تا ۶ ساعت هنگام آبیاری و۷۲ ساعت بعد از آبیاری

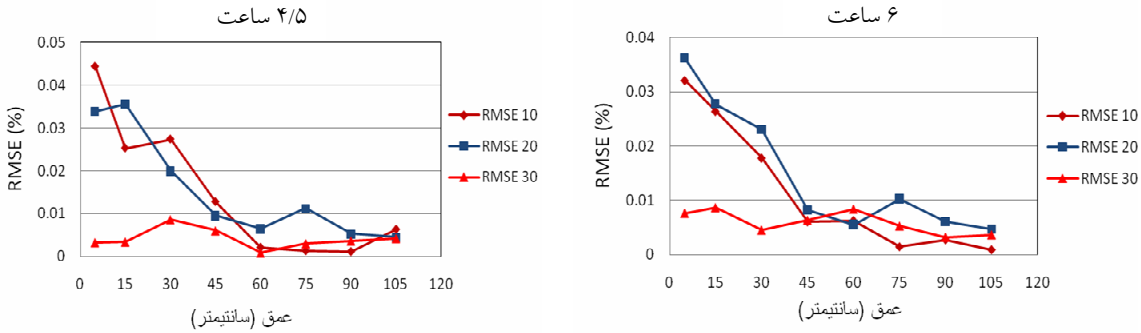
افزایش نیافته، برازش دقیق‌تری از مقدار رطوبت خاک نسبت به نقاطی که رطوبت خاک بیشتر است، داشته باشد. با افزایش زمان آبیاری (۳ ساعت) و پیشروی رطوبت تا فواصل عرضی ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری از قطره چکان (شکل ۲)، و نفوذ آب به عمق‌های پایین‌تر، میزان رطوبت خاک در نقاط فوق بیشتر شده است. در این حالت مشاهده می‌گردد انحراف تخمین‌های مدل نسبت به مقادیر تجربی در این اعماق نیز افزایش یافته است (شکل۲). مقدار RMSE مدل مورد مطالعه پس از ۶ ساعت از آبیاری در شکل ۳ آمده است. میزان RMSE در کلیه پروفیل‌های فواصل عرضی مورد مطالعه، در سطح خاک بیشترین مقادیر و به سمت عمق کاهش یافته است. به نظر می‌رسد با یکنواخت شدن رطوبت خاک در اثر توزیع مجدد رطوبت، مدل بهتر توانسته است مقادیر رطوبت خاک را برآورد کند. از طرفی نتایج نشان داد که با گذشت زمان رطوبت هم به سمت عمق و هم در جهت افق گسترش یافته است، که این امر منجر به افزایش میزان RMSE در فواصل عرضی ۲۰ و ۳۰

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]



شکل۲. مقایسه میزان خطاء ایجاد شده بین داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده توسط مدل در فواصل و عمق‌های مختلف از قطره چکان در زمان‌های ۱/۵ و ۳ ساعت بعد از آبیاری



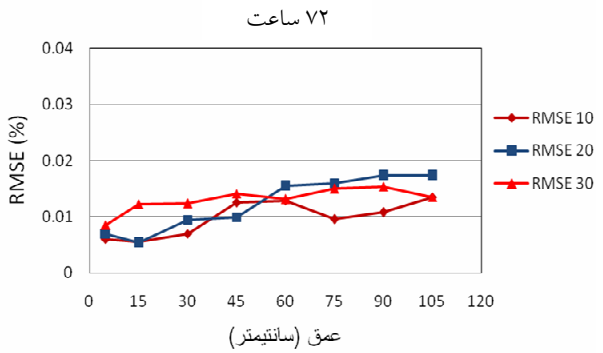
شکل۳. مقایسه میزان خطای ایجاد شده بین داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده توسط مدل در فواصل و عمق‌های مختلف از قطره چکان در زمان‌های ۴/۵ و ۶ ساعت پس از آبیاری

سانتی‌متری و در کلیه عمق‌های مورد مطالعه می‌گردد. بر این اساس پس از ۶ ساعت از آبیاری جبهه رطوبتی به فاصله عرضی ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری از قطره چکان رسیده است. بنابراین چنین می‌توان فرض کرد که با رسیدن جبهه رطوبتی به نقاط مورد مطالعه مذکور، تخمین این نقاط توسط مدل سخت‌تر شده و مدل دقت کمتری برای تخمین رطوبت خاک دارد.

شکل ۴ مقدار RMSE را برای کلیه نقاط مورد مطالعه پس از ۷۲ ساعت از آبیاری نشان داده است. مقدار RMSE با گذشت ۳ روز از اتمام آبیاری و توزیع یکنواخت رطوبت در کل پروفیل خاک نسبت به زمان‌های اولیه آبیاری، در تمام نیمرخ خاک کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است (میانگین مقدار RMSE۰/۰۵ در زمان آبیاری و مقدار ۰/۰۰۲ بعد از گذشت ۷۲ ساعت). اما مقایسه میزان موفقیت مدل در زمان ۷۲ ساعت پس از آبیاری و در طول نیمرخ خاک، نشان داد با پیشروی رطوبت به سمت عمق (عمودی) و به سمت طرفین (افقی یا عرضی) مقدار خطای نسبی در نقاط با میزان رطوبت زیادتر، بیشتر از عمق‌های سطح و نزدیک قطره چکان می‌باشد. در نتیجه میزان دقت مدل در برآورد رطوبت در این زمان و در نقاط پر رطوبت‌تر نسبت به سایر نقاط در همین زمان کاهش می‌یابد. در این زمان سهم زیادی از آبی که به خاک اضافه شده است توسط نیروی ثقل به سمت عمق حرکت کرده و بخشی از رطوبت نیز در جهت افقی از قطره چکان فاصله گرفته است. به نظر می‌رسد مدل میزان رطوبت خاک را به ازای زمان ۷۲ ساعت از آبیاری در نقاطی که افزایش رطوبت در آنجا رخ داده است، را

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]



شکل۴. مقایسه میزان خطای ایجاد شده بین داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده توسط مدل در فواصل و عمق‌های مختلف از قطره چکان در زمان ۷۲ از اتمام آبیاری

نیز با دقت نازل‌تری نسبت به نقاط با رطوبت کمتر تخمین می‌زند. این نتایج برای مقدار رطوبت در جهت افقی نیز مشاهده شده است (شکل۴).

براساس نتایج به‌دست آمده میزان خطای مدل در زمان‌های آبیاری که نقاط دارای درصد رطوبت بیشتری می‌باشند، بیشتر از روزهای بعد از آبیاری است و با گذشت چندین روز از پایان آبیاری، انطباق بین داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از تخمین مدل بیشتر شده است. در این رابطه کندلوس و سیمیونک (۱۰) در یک خاک لوم شنی و عمق کارگزاری ۳۰ سانتی‌متر برای قطره چکان و اندازه‌گیری درصد رطوبت به مدت ۴ روز از پایان آبیاری به این مطلب اشاره کرده‌اند که مطابقت بین داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده توسط مدل از روز سوم به بعد بیشتر می‌گردد. به‌طور کلی مقدار RMSE از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵ در تمام زمان‌های آزمایش تغییر کرد. این نتایج با داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های صحرایی که توسط اسکگز و همکاران (۱۴) در یک خاک با بافت لوم شنی و با قطره چکان واقع شده در عمق ۶ سانتی‌متری انجام شده بود، مقایسه گردید. آنها جهت بررسی میزان دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط مدل از مقادیر درصدهای رطوبت اندازه‌گیری شده بعد از کاربرد سه حجم متفاوت آبیاری استفاده کردند. مقدار RMSE از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۴ برای شرایط آزمایش آنها تغییر کرد. آنها معتقدند که این میزان خطا قابل قبول بوده و بنابراین تطابق خوبی میان داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد(۱۴).

هم‌چنین نتایج با آزمایش‌های صورت گرفته توسط کندلوس و سیمیونک (۱۰) نیز مورد مقایسه قرار گرفت. آنها به بررسی دقت شبیه‌سازی‌های مدل در دامنه وسیع‌تری از متغیرها (عمق‌های متفاوت کارگذاری قطره چکان در دو آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی) پرداختند. از پارامتر آماری RMSE نیز جهت تعیین میزان انطباق شبیه‌سازی‌ها با مقادیر واقعی استفاده نموده و نتایج را با مقادیر ارائه شده توسط اسکگز و همکاران مورد سنجش قرار دادند. میزان خطاهای ایجاد شده در این آزمایش نیز در محدوده ذکر شده توسط اسکگز و همکاران بود. بر این اساس آنها معتقدند که خطاهای ایجاد شده ناچیز بوده و می‌توان از مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف قطره چکان استفاده کرد(۱۰). علی‌رغم وجود میزان خطاهای نسبی در مقایسات بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط مدل در زمان‌ها و فواصل مختلف از قطره چکان، میزان کل خطاهای ایجاد شده در این آزمایش (مقدار RMSE از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵) در محدوده ارائه شده توسط اسکگز و همکاران(۱۴) وکندلوس و سیمیونک (۱۰) می‌باشد (مقدار RMSE از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۴). این مطلب بیانگر کفایت بالای این مدل در برآورد جبهه رطوبت اطراف قطره‌چکان به‌خصوص برای زمان‌های طولانی آبیاری و زمان‌های بعد از آن است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دقت شبیه‌سازی‌های HYDRUS–2D در برآورد میزان نفوذ وتوزیع مجدد رطوبت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک شنی ارزیابی شد. توزیع‌های درصد رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل HYDRUS–2D با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت. البته در همه زمان‌ها و در همه نقاط پروفیل خاک، دقت پیش‌بینی رطوبت خاک توسط مدل، نسبت به داده‌های تجربی یکسان نبود. در ساعات ابتدایی آبیاری میزان خطای محاسبه شده مدل (RMSE) در نقاط نزدیک قطره چکان بیشتر از فواصل و عمق‌های دیگر بود. در این ساعات، مدل رطوبت خاک را در عمق‌های پایین‌تر بهتر تخمین زده است. در این اعماق میزان رطوبت خاک نسبت به عمق‌های بالا کمتر بوده و لذا به نظر می‌رسد مدل توانسته است در نقاطی که رطوبت خاک هنوز افزایش نیافته، برازش دقیق‌تری از مقدار رطوبت خاک نسبت به نقاطی که رطوبت خاک بیشتر است، داشته باشد. با افزایش زمان آبیاری و نفوذ آب به عمق‌های پایین‌تر، میزان رطوبت خاک در این نقاط بیشتر شده و انحراف تخمین‌های مدل نیز نسبت به مقادیر تجربی افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که مدل میزان رطوبت خاک را در نقاطی که افزایش رطوبت در آنجا رخ داده است، با خطای بیشتری تخمین می‌زند. البته مقدار کل خطای محاسبه شده بین تخمین‌های مدل و مقادیر تجربی به ازای تمام ساعات آبیاری در رنج قابل قبول ارائه شده توسط سایر محققین بود. هم‌چنین با یکنواخت شدن توزیع رطوبت در خاک و توزیع مجدد رطوبت در زمان‌های بعد از آبیاری میزان انحراف داده‌ها کمتر شد و بر میزان انطباق داده‌های تخمین‌زده شده از مدل و داده‌های تجربی افزوده گردید.

منابع مورد استفاده

۱. اژدری، خ. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی۱(۱۵): ۱-۱۴.

۲. ترابی، م. و س. ح. صدرقائن. ۱۳۸۲. ارزیابی یک مدل نیمه تجربی برای تخمین ابعاد پیاز رطوبتی و فاصله قطره چکان‌ها. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۱۷(۴): ۱۵-۲۸.

۳. ستوده‌نیا، ع.، س. م. میر لطفی، م. ح. مهدیان و ج. رزاقی. ۱۳۸۰. مقایسه لوله‌های پی وی سی (PVC) و تکانات (TEKANAT) در رطوبت‌سنجی توسط دستگاه بازتاب زمانی امواج (TDR). مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۷(۲): ۷۹-۸۷.

۴. ملایی کندلوس، م.، ع. لیاقت و ف. عباسی. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجموعه مقالات دومین کارگاه فنی خرد آبیاری، تهران، ۲ آذر، ص۲۷-۱۸.

۵. ملایی کندلوس، م.، ع. لیاقت و ف. عباسی. ۱۳۸۶. استفاده از آنالیز ابعادی در تعیین ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI). نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، http://www.civilica.com/Paper-ABYARI09-ABYARI09_147.html (۲۴ مهر ۱۳۸۸).

۶. ملایی کندلوس، م.، ع. لیاقت و ف. عباسی. ۱۳۸۷. برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از آنالیز ابعادی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۳۹(۲): ۳۷۱-۳۷۸.

7. Cook, F.J., P. Fitch, P.J. Thorburn, P.B. Charlesworth and K.L. Bristow. 2006. Modeling trickle irrigation: Comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. Environ. Modeling & Software 21: 1353-1359.

8. Elmaloglou, S.R. and E. Diamantopoulos. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line source. Agric. Water Manage. 96: 1587-1595.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]

9. IMKO Company. 1998. User's Manual, moisture measuring systems for soil science, http://www.imko.de/en/products/soilmoisture/mobile-trime-meters (2010/2/5).
10. Kandelous, M.M. and J. Simunek. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. Agric. Water Manage. 97: 1070-1076.
11. Simunek, J., M. Sejna and M. Th. van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media, Version 2.0. Rep. IGCWMC-TPS-53, p 251, Intl. Ground Water Modeling Center, Colo. School of Mines, Golden, CO.
12. Singh, D.K., T.B.S. Ragput, H.S. Sikarwar, R.N. Sahoo and T. Ahmad. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. Agric. Water Manage. 83: 130-134.
13. Siyal, A.A. and T.H. Skaggs. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation, Agric. Water Manage. 96: 893-904.
14. Skaggs, T.H., T.J. Trout, J. Simunek and P.J. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. J. Irrig. Drain. Eng. 4: 304-310.
15. Trenton, L.R., A.W. Scoll, W.W. Arthurw and L.T. Thomas. 2008. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation, Agric. Water Manage. 95(6): 669-677.
16. Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 63(11): 1309–1313.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.5.2]