

مقاله علمی-مروری

مروری بر انواع روش‌های مدل‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای

ساناز محمدی^{۱*} و ایمان حاجی‌راد^۲

چکیده

طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای شامل انتخاب ترکیب مناسبی از نرخ دبی قطره‌چکان و فاصله بین قطره‌چکان‌های آبیاری برای هر مجموعه معینی از خاک، گیاه و شرایط اقلیمی است. طراحی باید به گونه‌ای باشد که الگوی خیس‌شدگی و توزیع رطوبت اطراف قطره‌چکان آبیاری با الگوی رشد ریشه مطابقت داشته باشد. ماهیت چند بُعدی جریان آب در خاک، جذب ریشه گیاه و دور آبیاری کوتاه، باعث افزایش پیچیدگی مدل‌سازی دینامیک رطوبت خاک در سامانه آبیاری قطره‌ای می‌شود. اکثر پژوهشگران برای مدل‌سازی نفوذ از یک منبع آبیاری نقطه‌ای از روش‌های حل تحلیلی، نیمه‌تحلیلی و عددی معادله ریچاردز با شرایط مرزی معین برای طراحی، اجرا و مدیریت سامانه آبیاری قطره‌ای به دلیل مزایایی که این روش‌ها نسبت به اندازه‌گیری‌های مستقیم دارند، استفاده می‌کنند. برخی پژوهشگران نیز مدل‌هایی را بر اساس معادله گرین-امپت توسعه دادند و یا از مدل‌های تجربی (بر اساس روش‌های رگرسیون و تحلیل ابعادی) و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای توصیف نفوذ از یک منبع آبیاری نقطه‌ای یا خطی استفاده می‌کنند. در این مطالعه مروری به بررسی نحوه توزیع رطوبت در خاک تحت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و ارائه روش‌های مختلف مدل‌سازی آن، مزایا و معایب این روش‌ها پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوی خیس‌شدگی، تحلیل ابعادی، توزیع رطوبت، قطره‌چکان، معادله ریچاردز

مقدمه

شامل یک دوره نسبتاً کوتاه نفوذ و به دنبال آن یک دوره طولانی توزیع مجدد، تبخیر و جذب آب توسط ریشه گیاهان است (Eisenhauer et al., 2021). در طول دوره تبخیر-تعرق، نیروهای موینگی غالب می‌شوند و حرکت خالص آب در جهت عمودی و به سمت بالا است. نفوذ آب به داخل خاک و توزیع مجدد و تبخیر متعاقب آن، در این نوع سامانه‌های آبیاری اغلب به عنوان جریان یک‌بعدی قابل تجزیه و تحلیل است؛ بنابراین، روش‌های آبیاری سنتی باعث ایجاد نوسانات زیاد آب در داخل خاک می‌شوند که بر رشد و عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد. نوسانات زیاد رطوبت خاک را می‌توان تا حدودی با استفاده از روش‌های آبیاری که دور آبیاری کوتاه همراه با عمق آبیاری کم دارند مانند روش آبیاری قطره‌ای تعدیل کرد. در این شرایط رطوبت منطقه توسعه ریشه گیاه همواره در حد مطلوب حفظ شده و گیاه کمتر تحت تنش آبی قرار گیرد (Aiswarya and Sandeepika,

در سامانه آبیاری جویچه‌ای، ثقلی و بارانی متحرک، سعی در به حداقل رساندن تعداد نوبت‌های آبیاری با افزایش فاصله بین دو آبیاری متوالی و به حداکثر رساندن عمق آب آبیاری در هر نوبت، بدون کاهش عملکرد اقتصادی محصول است. در این شرایط نیروی غالب حاکم بر حرکت آب در خاک در هنگام آبیاری نیروی جاذبه یا نیروی ثقل است. چرخه آبیاری در این نوع سامانه آبیاری

^۱ دکتری گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (* نویسنده مسئول: Sanaz.mohammadi@modares.ac.ir)

^۲ دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹

عمق نصب بهینه لترال‌ها در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی را برای به حداقل رساندن هدررفت ناشی از نفوذ عمقی، آبیاری کود و مواد غذایی و انتخاب نوع محصول فراهم می‌کند. همچنین می‌تواند بر الگوی توزیع ریشه در خاک و سرعت جذب آب توسط ریشه گیاه نیز تأثیر بگذارد (Mohammadi et al., 2023). همچنین اطلاع از حجم خاک خیس شده در زیر قطره‌چکان آبیاری و عمق ریشه‌زایی برای تخمین مقدار رطوبت خاکی که می‌تواند در دسترس ریشه گیاه قرار گیرد، ضروری است (Liu et al., 2015). عدم اطلاع از ابعاد الگوی خیس‌شدگی اطراف قطره‌چکان آبیاری منجر به مدیریت نامناسب و راندمان پایین مصرف آب در سامانه آبیاری قطره‌ای می‌گردد (Lubana and Narda, 2001). الگوی خیس‌شدگی را می‌توان با اندازه‌گیری مستقیم حجم خیس‌شده خاک در مزرعه به دست آورد، اما باید توجه داشت که شرایط مکانی خاص آن منطقه مانند وجود لایه‌های متراکم در اعماق خاک یا شرایط خاص لایه سطحی خاک و همچنین نصب دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌تواند الگوی خیس‌شدگی خاک را در حین اندازه‌گیری تحت تأثیر قرار دهد (Thorburn et al., 2003)؛ بنابراین پژوهشگران ترجیح می‌دهند برای طراحی، اجرا و مدیریت سامانه آبیاری قطره‌ای از مدل‌های ریاضی برای توصیف نفوذ از یک منبع نقطه‌ای یا خطی استفاده کنند. استفاده آسان، امکان تهیه پارامترهای ورودی مورد نیاز از مقالات منتشرشده و پایگاه‌های داده الکترونیکی و امکان لحاظ تنوع مکانی پارامترهای خاک از جمله مزایای مدل‌های ریاضی نسبت به روش‌های برآوردی می‌باشند. هدف از تحقیق حاضر درک بهتر توزیع رطوبت در خاک، مروری بر مدل‌های مختلف توسعه‌یافته برای تعیین الگوی خیس‌شدگی خاک در سامانه آبیاری قطره‌ای و مزایا و معایب هر کدام است. مقاله حاضر با مشخص کردن مسیر پیموده شده توسط تحقیقات و مطالعات پژوهش‌گران از گذشته تاکنون در زمینه مدل‌سازی رطوبت خاک، می‌تواند راهنمایی باشد برای علاقه‌مندان به این موضوع تا در مطالعات آینده خود در مورد استفاده از روش‌های موجود و یا توسعه روش‌های جدیدتر با توجه به محدودیت‌های روش‌های قبلی راحت‌تر تصمیم‌گیری کنند.

(2024). امروزه دانشمندان، پژوهشگران، مدیران آبیاری، کشاورزان و دستداران محیط‌زیست استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای را ترجیح می‌دهند، چرا که در این سامانه‌ها می‌توان شسته شدن کودها و مواد شیمیایی و در نتیجه آن آلودگی آب‌های زیرزمینی را به حداقل و بهینه‌سازی جذب آب توسط ریشه گیاه و راندمان کاربرد آب در مزرعه را به حداکثر رساند (Mohammadi et al., 2021) (حاجی‌راد و همکاران، ۱۴۰۰). سامانه آبیاری قطره‌ای، برخلاف سامانه آبیاری سنتی که آب را در کل سطح خاک مزرعه پخش می‌کند، آب را در نقاط مجزایی از سطح خاک (اطراف ردیف گیاهی یا پای درخت) به مقدار کم و مورد نیاز تحویل ریشه گیاه می‌دهد (Hajirad et al., 2021). هنگامی که قطره‌چکان شروع به کار می‌کند، یک ناحیه دایره‌ای به شکل حوضچه کوچک در مجاورت خروجی قطره‌چکان ایجاد می‌شود. این ناحیه در ابتدا بسیار کوچک است و سپس با گذشت زمان به دلیل: (الف) کاهش نرخ نفوذ و (ب) ثابت بودن دبی قطره‌چکان، افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نازک بودن حجم لایه آب روی خاک، می‌توان از تأثیر ذخیره آب در سطح خاک صرف‌نظر کرد، بدان معنی که آب خروجی از قطره‌چکان می‌تواند به‌طور آنی در خاک نفوذ کند یا در هوا تبخیر شود. سرعت تبخیر تنها زمانی به یک عامل مهم تبدیل می‌شود که شدت تبخیر پتانسیل بسیار زیاد (۱۰ میلی‌متر در روز) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بسیار کم باشد (۰/۱ سانتی‌متر در ساعت) (Yang et al., 2023).

برای دستیابی به یک سامانه آبیاری قطره‌ای کارآمد و جلوگیری از تلفات آبیاری در این سامانه‌ها، داشتن یک طراحی دقیق و برنامه‌ریزی آبیاری صحیح اهمیت فراوانی دارد که می‌توان آن را بر اساس نحوه توزیع رطوبت در خاک ارزیابی کرد (Bajpai and kaushal, 2020). یکی از پارامترهای مؤثر بر توزیع رطوبت خاک در شرایط مزرعه، ویژگی‌های هیدرولیکی سامانه آبیاری قطره‌ای است که می‌توان با اطلاع از الگوی خیس‌شدگی خاک در اطراف قطره‌چکان آبیاری یعنی عمق و عرض پیاز رطوبتی آن را تعیین کرد. عرض خیس‌شده پیاز رطوبتی تعیین‌کننده فاصله بهینه بین قطره‌چکان‌ها روی یک خط لترال آبیاری است. عمق خیس‌شده پیاز رطوبتی نیز امکان محاسبه زمان بهینه آبیاری و

مواد و روش‌ها

مقاله حاضر در راستای تحلیل روش‌های مختلف بررسی توزیع رطوبت در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای و بیان مزایا و معایب آن‌ها انجام شده است. بدین منظور یک جستجوی جامع در پایگاه‌های داده‌ای مختلف با استفاده از کلیدواژه‌هایی مانند آبیاری قطره‌ای، توزیع رطوبت و مدل‌سازی رطوبت انجام دادیم تا مطالعات مرتبط را جمع‌آوری کنیم. مطالعات بر اساس مرتبط بودن با موضوع، نوآوری در روش‌ها و استحکام یافته‌ها انتخاب شدند. مطالعات انتخابی بر اساس رویکرد مدل‌سازی مورد استفاده در آن‌ها، مانند روش‌های حل تحلیلی، نیمه‌تحلیلی، عددی یا تجربی و شبکه‌های عصبی مصنوعی دسته‌بندی شده و یافته‌های آن‌ها برای شناسایی روندها، مزایا و محدودیت‌ها ترکیب شدند.

توزیع رطوبت در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای

بررسی جریان آب در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای پیچیده است. مدل‌سازی حرکت آب در نیم‌رخ خاک شامل دو فاز نفوذ^۱ و توزیع مجدد^۲ است. نفوذ به‌عنوان فرآیند اولیه ورود آب به داخل خاک در نتیجه آبیاری در سطح خاک تعریف می‌شود که در این مرحله نیروهای موینگی یا پتانسیل‌های ماتریک غالب هستند (Eltarabily et al., 2024). توزیع مجدد به‌عنوان مرحله بعدی رخ می‌دهد که در آن آب نفوذ یافته به داخل خاک، پس از توقف دبی ورودی به سطح خاک، مجدداً در پروفایل خاک توزیع می‌شود. در طول توزیع مجدد، هر دو نیروی موینگی و ثقل مؤثر هستند. خشک و خیس شدن هم‌زمان نیز در این مرحله انجام می‌شود و تأثیر پدیده هیستریزیس^۳ ممکن است مهم باشد. با توجه به این‌که در سامانه آبیاری قطره‌ای، آبیاری‌ها به‌صورت مکرر و به مقدار کم در مجاورت ریشه گیاهان انجام می‌شود، تغییرات رطوبت ناشی از توزیع مجدد، پیامد چندانی ندارد و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد؛

بنابراین، در این سامانه‌ها بحث حرکت آب در خاک فقط محدود به فاز نفوذ آب در داخل خاک است (Lubana and Narda, 2001). معادله ریچاردز^۴ (RE) یک رویکرد استاندارد و پرکاربرد برای مدل‌سازی و توصیف جریان در محیط‌های متخلخل غیراشباع متغیر است. معادله ریچاردز برای جریان سه‌بعدی آب در خاک رفتار هذلولی-بیضوی مخلوط^۵ را در نظر می‌گیرد. تاکنون تلاش‌های زیادی برای حل معادله ریچاردز با استفاده از روش‌های تحلیلی^۶ (حل مستقیم معادلات دیفرانسیل)، نیمه‌تحلیلی^۷ (شامل برخی از توابع یا انتگرال‌هایی که باید از طرق روش‌های عددی تجزیه‌وتحلیل شوند) و عددی^۸ انجام شده است (Kutilek and Nielsen, 1994). برخی پژوهشگران معادله گرین-آمپت^۹ را جایگزین معادله ریچاردز برای مدل‌سازی رژیم‌های رطوبتی حاصل از منبع آبیاری نقطه‌ای کردند. برخی دیگر نیز مدل‌های تجربی را با استفاده از روش‌های رگرسیون^{۱۰}، آنالیز ابعادی^{۱۱} و شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۲} توسعه دادند.

معادله ریچاردز حاکم بر جریان آب در خاک

اساس RE، قانون داری و اصل بقای جرم است. در شرایط غیرماندگار شدت جریان ورودی به خاک برابر با شدت جریان خروجی نیست و مقداری از جریان ورودی در خاک ذخیره شده یا توسط ریشه گیاه برداشت می‌شود. با توجه به این‌که شدت تغییرات جرم را می‌توان بر پایه فرضیه عدم تغییر شکل خاک به تغییرات رطوبت نسبت داد؛ بنابراین شکل کلی معادله حرکت آب در خاک برای جریان غیرماندگار که به معادله ریچاردز معروف است به‌صورت زیر خواهد بود (Farthing and Ogden, 2017):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla[K(h)\nabla H] - S \quad (1)$$

$$H = h - z + \pi \quad (2)$$

⁷ Semi-analytical

⁸ Numerical

⁹ Green-Ampt

¹⁰ Regression

¹¹ Dimensional analysis

¹² Artificial neural networks

¹ Infiltration

² Redistribution

³ Hysteresis

⁴ Richards' equation

⁵ Mixed hyperbolic-elliptic

⁶ Analytical

حل معادله ریچاردز به دلیل غیرخطی بودن رابطه هدایت هیدرولیکی و رطوبت خاک دشوار است؛ بنابراین حل این معادله نیازمند روابط ترکیبی توصیف کننده وابستگی متقابل فشار، شرایط اشباع و هدایت هیدرولیکی خاک است. روش‌های حل معادله ریچاردز به سه دسته کلی روش‌های تحلیلی، نیمه تحلیلی و عددی تقسیم بندی می‌شوند. در ادامه به بررسی مدل‌های توسعه یافته تحت هر روش پرداخته خواهد شد.

روش‌های حل تحلیلی معادله ریچاردز

در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، رطوبت ناحیه توسعه ریشه گیاه همواره در شرایط مطلوبی قرار دارد. در این روش آبیاری مرحله نفوذ آب نسبت به مراحل توزیع مجدد و تبخیر- تعرق طولانی‌تر بوده و از اهمیت بیشتری برخوردار است. با در نظر گرفتن این شرایط پژوهشگران به دنبال راه‌حل‌های تحلیلی ساده شده برای توزیع رطوبت در خاک اطراف یک قطره چکان آبیاری با فرض غلبه فاز نفوذ و شرایط جریان تقریباً پایدار (تخلیه مداوم آب از قطره چکان) هستند. روش‌های تحلیلی یک رویکرد ریاضی کلاسیک برای حل معادلات دیفرانسیل می‌باشند که منجر به حل دقیق یک مسئله خاص می‌شوند. این روش‌ها معمولاً با اعمال تبدیل‌های مختلف در معادلات حاکم (مانند تبدیل لاپلاس یا تبدیل فوریه)، جداسازی متغیرها و یا با استفاده از تابع گرین^۱ به دست می‌آیند (Leij et al., 2000). راه‌حل‌های تحلیلی معمولاً فقط برای سیستم‌های انتقال ساده و هندسه‌های ساده شده دامنه انتقال، به کار می‌روند و با در نظر گرفتن یک یا تعدادی از محدودیت‌هایی همچون فرض جبهه رطوبتی کاملاً مشخص، تابع دلتا یا انتشار ثابت، تابع هدایت هیدرولیکی خطی (K, θ) خاک همگن و توزیع یکنواخت رطوبت اولیه ساده سازی می‌شوند (Ravi et al., 1998).

برای به دست آوردن راه‌حل‌های تحلیلی، معادله ریچاردز باید به شکل رطوبتی که راه‌حل‌های آن در دسترس است تبدیل شود (Carslaw and Jaeger, 1959). روش‌های حل تحلیلی دقیق به دلیل سهولت کاربردی که دارند نسبت به سایر تکنیک‌ها مطلوب‌تر

در این روابط ∇ عملگر گرادیان، θ رطوبت حجمی خاک به صورت تابعی از مکان و زمان K, t هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک (cm/s) به عنوان تابعی از پتانسیل فشاری، H کل پتانسیل آب خاک (cm)، h پتانسیل فشاری، z پتانسیل ثقلی، π پتانسیل اسمزی و S پارامتر جذب آب توسط ریشه گیاه است. معادله ریچاردز امکان ادغام دو فرآیند جذب آب توسط ریشه و حرکت آب در خاک را فراهم می‌کند. چالش اصلی برای کاربرد عملی معادله (۱) تعیین تابعی برای پارامتر جذب آب توسط ریشه گیاه است که هم توزیع مکانی و هم شدت جذب آب توسط ریشه را توصیف کند. مولز بررسی دقیقی از مدل‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی برای تخمین پارامتر جذب ریشه ارائه کرد (Molz, 1981). اگر پتانسیل اسمزی ناچیز فرض شود معادله (۱) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla[K(h)\nabla h] - \frac{\partial K}{\partial z} - S \quad (۳)$$

معادله (۳) فرم مختلط معادله ریچاردز نامیده می‌شود. مزیت اصلی این معادله وجود قانون بقای جرم و جریان آب در خاک به عنوان جز ذاتی حل معادله است. مشکل معادله وجود دو متغیر وابسته در آن است: رطوبت موجود در خاک (θ) و پتانسیل فشاری ناشی از آن (h) . فرم ماتریکی معادله ریچاردز از ترکیب مفهوم ظرفیت آب خاک که از شیب منحنی مشخصه خاک تقریب می‌شود و معادله (۳) حاصل می‌شود:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla[K(h)\nabla h] - \frac{\partial k}{\partial z} - S \quad (۴)$$

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad (۵)$$

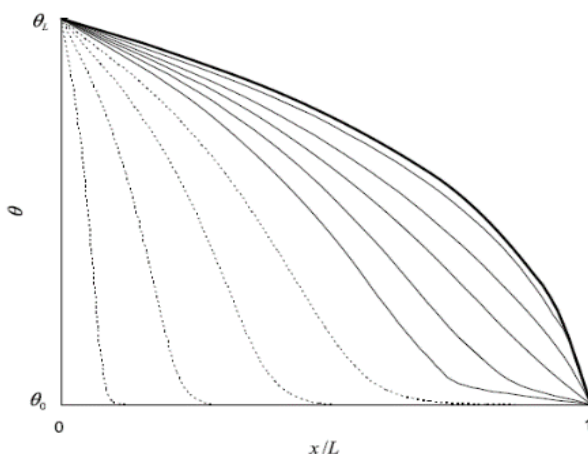
فرم رطوبتی معادله ریچاردز نیز از ترکیب پارامتر ضریب پخشیدگی (D) که تابعی از هدایت هیدرولیکی و رطوبت خاک است با معادله (۳) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla[D(\theta)\nabla \theta] - \frac{\partial K}{\partial z} - S \quad (۶)$$

¹ Green's Function

هیدرولیکی، راه‌حل‌های تقریبی شبه خطی^۲ و راه‌حل‌های نفوذ گذرا^۳ با استفاده از اشکال خاص منحنی‌های نگهداشت آب خاک تقسیم‌بندی کرد.

چن و دای طی مطالعه‌ای تغییرات موقعیت جبهه خیس‌شدگی خاک را تحلیل کرده و یک راه‌حل تحلیلی تقریبی برای معادله ریچاردز با شرایط مرزی محدود توسعه دادند (Chen and Dai, 2017). راه‌حل ارائه شده توسط این پژوهشگران مناسب مسائل مربوط به نفوذ افقی است و به کمک آن می‌توان خطوط پر رنگ نشان داده شده در شکل (۱) را تخمین زد که به صورت یک راه‌حل سری است. پارامترهای θ_0 و θ_L مقدار رطوبت ثابت محیط متخلخل غیراشباع در دامنه محدود $x = 0$ و $x = L$ است که بیانگر شرایط مرزی دیرچلت^۴ است.



شکل ۱- نفوذ افقی در یک لایه محدود که نشان‌دهنده موقعیت جبهه رطوبتی در شرایط مرزی نیمه‌محدود (خطوط نقطه‌چین) و محدود (خطوط پررنگ) است (Chen and Dai, 2017).

قرار گرفتند که نتایج نشان داد هر دو راه‌حل با هم منطبق هستند و کمتر از ۲ درصد اختلاف دارند. راه‌حل‌های دو بعدی و سه بعدی نفوذ عمودی آب برای شرایط مرزی و اولیه ثابت، بدون جریان و سینوسی توسعه یافتند (Sanayei et al., 2017). بایامونته یک حل تحلیلی دقیق و ساده از معادله ریچاردز تحت شرایط نفوذ ثقلی

هستند. اگرچه پیشرفت قابل‌توجهی در مدل‌سازی عددی جریان و نفوذ غیراشباع صورت گرفته است، اما روش‌های تحلیلی هنوز هم غیرقابل جایگزین هستند، چرا که راه‌حل‌های تحلیلی، در صورت وجود، بینش مستقیم‌تری به فیزیک پدیده‌های جریان غیراشباع نسبت به مطالعات عددی یا آزمایشگاهی ارائه می‌کنند. علاوه بر این در مطالعات عددی، اغلب به راه‌حل‌های تحلیلی برای بررسی و تأیید نتایج حل عددی نیاز است (Wu and Pan, 2005; Vanderborght et al., 2005). با توجه به این که در راه‌حل‌های تحلیلی شرایط مرزی و اولیه با توجه به ماهیت مسئله‌ای که باید حل شود فرموله می‌شود، بنابراین برای مسائل مربوط به نفوذ، توزیع مجدد، تبخیر و زهکشی شرایط متفاوتی مورد نیاز است (Hanks, 2012).

راه‌حل‌های تحلیلی موجود برای حل معادله ریچاردز را می‌توان به صورت راه‌حل‌های حالت پایدار^۱ با استفاده از مدل‌نمایی هدایت

صنایعی و همکاران در پژوهشی با استفاده از روش جداسازی متغیرها و بسط سری فوریه، یک راه‌حل تحلیلی جدید برای معادله ریچاردز در یک، دو و سه بعد با شرایط مرزی و اولیه مختلف ارائه کردند. راه‌حل‌های ارائه‌شده برای نفوذ عمودی و افقی یک‌بعدی و دو بعدی با راه‌حل‌های عددی روش تفاضل محدود مورد مقایسه

³ Transient infiltration solutions
⁴ Dirichlet boundary condition

¹ Steady-state solutions
² Quasi-linear approximation solutions

بود؛ بنابراین نتایج نشان داد که این استراتژی در برابر شرایط مرزی مختلف انعطاف‌پذیر است (Aryeni and Ginting, 2022).

روش‌های حل عددی معادله ریچاردز

ماهیت غیرخطی معادله ریچاردز، به دلیل وابستگی هدایت هیدرولیکی و ضریب پخشیدگی به میزان رطوبت، حل معادله ریچاردز را با استفاده از رویکردهای تحلیلی به‌جز چند مورد خاص، عملاً غیرممکن می‌کند (Arampatzis et al., 2001; Kavetski et al., 2002). در روش‌های تحلیلی حل معادله ریچاردز منحصرأً به مسائل جذب (حرکت رطوبت بدون دخالت نیروی ثقل) و نفوذ پرداخته می‌شود و مسائل مربوط به توزیع مجدد و زهکشی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. انواع روش‌های حل عددی مانند تفاضل محدود^۲ (FDM)، تفاضل محدود یکپارچه^۴ (IFDM)، اجزا محدود^۵ (FEM) و روش‌های اجزا مرزی^۶ (BEM) برای حل مسائل جریان اشباع متغیر استفاده می‌شوند. روش‌های تفاضل محدود و اجزا محدود مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی^۷ (PDE) که تشکیل یک مدل ریاضی می‌دهند را به مجموعه‌ای از معادلات جبری که یک مدل گسسته را ایجاد می‌کنند، تبدیل می‌کنند (Wang and Anderson 1995). سپس یک راه‌حل تقریبی با استفاده از تکنیک‌های تکراری یا روش‌های ماتریس مستقیم برای حل مجموعه معادلات جبری به‌دست می‌آید. مزایای روش تفاضل محدود نسبت به روش اجزا محدود ساده‌تر بودن برای درک و برنامه‌ریزی و نیاز به داده‌های ورودی کم‌تر است. همچنین روش اجزا محدود نسبت به روش تفاضل محدود به‌دلیل سهولت درون‌یابی داده‌ها، امکان برازش نواحی با هندسه نامنظم، ادغام ویژگی‌های محیط متخلخل ناهمگن و غیرایزوتروپ و امکان مدیریت بهتر مرزهای داخلی و ارائه شبیه‌سازی بهتر برای منابع^۸ نقطه‌ای (مانند قطره‌چکان آبیاری) و مصرف‌کننده‌ها^۹ (خاک یا گیاه یا...)، سطوح تراوش و ترازهای آب

و شدت بارش ثابت توسعه داد. راه‌حل ابتدا تحت قانون تورچلی^۱ ارائه شد که تابع هدایت هیدرولیکی خاک را تقلید می‌کند و می‌تواند فرآیند تخلیه یا پرشدن یک منبع آب غیرخطی را توصیف کند. سپس رویکرد مشابه برای تابع هدایت هیدرولیکی بروکس و کوری^۲ اعمال شد که ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را تحت شرایط نفوذ ثقلی به‌خوبی توصیف می‌کند. قابلیت اطمینان راه‌حل‌های ارائه شده با تأیید مثبت بیلان حجم آب برای تعدادی از کاربردها تحت هر دو قانون تورچلی و توابع هدایت هیدرولیکی بروکس و کوری نشان داده شد (Baiamonte, 2020).

روش‌های حل نیمه‌تحلیلی معادله ریچاردز

در روش‌های نیمه‌تحلیلی، بخشی از مسئله ریاضی را می‌توان با رویکرد تحلیلی و مابقی آن را به روش عددی حل کرد که معمولاً روش عددی لاپلاس معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش مسئله به‌صورت تحلیلی در دامنه لاپلاس حل می‌شود، اما برگرداندن آن به دامنه واقعی توسط یک الگوریتم عددی انجام می‌شود. در مقایسه با روش‌های صرفاً تحلیلی، روش‌های نیمه‌تحلیلی برای طیف وسیع‌تری از مسائل قابل‌استفاده هستند، اما در هر صورت مسائل باید نسبتاً ساده باشند. با در نظر گرفتن دینامیک آب و املاح، اور و مولوا^۳ برای بررسی انتقال آب و نیترات با حضور جذب ریشه و بدون حضور جذب ریشه گیاه برای یک منبع نقطه‌ای مدفون شده در خاک ارائه کردند (Mmolawa and Or, 2000a, b). آن‌ها در سال ۲۰۰۳ نیز یک مدل نیمه‌تحلیلی برای پیش‌بینی حرکت نیترات در شرایط جذب ریشه گیاه توسعه دادند (Mmolawa and Or, 2003). آرینی و جینتینگ یک راه‌حل نیمه‌تحلیلی برای معادله ریچاردز در شرایط خاک یک بعدی دو لایه با شرایط مرزی مختلف ارائه کردند. مقایسه استراتژی توسعه‌یافته توسط پژوهشگران با یک تقریب حجم محدود استاندارد نشان‌دهنده شباهت نزدیک راه‌حل‌ها

⁶ Boundary Element Methods

⁷ Partial differential equation

⁸ Sources

⁹ Sinks

¹ Torricelli's law

² Brooks and Corey

³ Finite Difference Methods

⁴ Integrated Finite Difference Methods

⁵ Finite Element Methods

غیراشباع استفاده شود. مدل‌های اجزای مرزی برای بررسی تأثیر شکل روزنه قطره‌چکان‌ها و در قطره‌چکان‌های مدفون در خاک (آبیاری قطره‌ای زیرسطحی) برای بررسی تأثیر عمق نصب قطره‌چکان‌ها بر نرخ نفوذ ثابت یا جریان خروجی از روزنه قطره‌چکان‌ها مناسب هستند (Pullan and Collins 1987). این مدل‌ها زمانی بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند که ابعاد "پياز رطوبتی مؤثر" (Philip, 1984) حاصل از قطره‌چکان‌های سطحی و زیرسطحی مشخص باشد. پياز رطوبتی مؤثر مشخص می‌کند که در صورت استفاده از تفاضل‌های محدود یا اجزای محدود، سایز دامنه شبکه‌بندی یا مش‌بندی چقدر باشد که در صورت لحاظ جریان، مدل اجزای مرزی انتخاب بهتری خواهد بود. کیفیت نتایج حاصل از روش‌های عددی به صحت شرایط مرزی، مناسب بودن معادلات مورد استفاده، صحت برآورد ورودی‌ها و خروجی‌ها، دقت و گستردگی داده‌های اندازه‌گیری شده، روش حل و درجه تقریب در گسسته‌سازی بستگی دارد (Cooper, 1990). سونگ و جیانگ یک روش عددی جدید به نام $D-GRW^1$ بر مبنای تسهیل داده‌ها برای حل فرم مختلط معادله ریچاردز ارائه کردند. این روش به‌طور هم‌افزایی طرح خطی‌سازی تطبیقی^۲، شبکه‌های عصبی و گام تصادفی جهانی^۳ را در یک چارچوب گسسته‌سازی حجم محدود برای تولید راه‌حل‌های عددی دقیق معادله ریچاردز با همگرایی تضمینی تحت فرضیات معقول باهم ادغام می‌کند. از طریق سه مثال گویا، دقت بالا و عملکرد نگهداری جرم روش $D-GRW$ مورد بحث قرار گرفت و با روش‌های عددی معیار نیز مقایسه شد (Song and Jiang, 2023). گاسیوروفسکی و کولرسکی یک روش عددی جدید بسیار کارآمد و دقیق برای حل معادله ریچاردز دو بُعدی ارائه کردند. الگوریتم توسعه‌یافته مبتنی بر تقسیم ابعادی بود، بدین معنی که معادلات یک بُعدی را می‌توان بسیار کارآمدتر از الگوریتم‌های دو بُعدی تقسیم نشده حل کرد (شکل ۲). چنین رویکرد تقسیمی به هر الگوریتمی این اجازه را می‌دهد که برای تقریب زمان و مکان مورد استفاده قرار گیرد که باعث افزایش دقت حل عددی می‌گردد (Gasiorowski and Kolerski, 2020).

متحرک دارای مزیت است. برای مسائلی در حالت پایدار و انتقالی با ضرایب متغیر در دو بعد، استفاده از روش اجزا محدود به‌دلیل زمان اجرای طولانی، نیاز به فضای ذخیره‌سازی زیاد و عدم دقت در مواجه با منابع و ترم‌های انتقال، توصیه نمی‌شود. برای مسائل سه بعدی، با توجه به فضای ذخیره‌سازی و زمان اجرا، استفاده از روش تفاضل محدود مناسب است. روش اجزا مرزی برای مسائل غیرخطی استفاده می‌شود که بر اساس حل دنباله‌ای از مسائل خطی و تکرار تا رسیدن به نتیجه نهایی است؛ بنابراین روش اجزا مرزی اساساً فقط می‌تواند برای مسائل خطی استفاده شود (Pullan and Collins 1987). با توجه به این که خطاهای گسسته‌سازی همواره در تقریب‌های عددی ایجاد می‌شوند، همگرایی تقریب‌ها و تخمین‌ها به جواب واقعی از اهمیت زیادی برخوردار است (Kavetski et al. 2001). پژوهشگران کمی از روش تفاضل‌های محدود برای حل مسائل جریان اشباع متغیر در دو بعد (Cooper, 1990; Ismail et al., 2006; Elmaloglou and Diamantopoulos, 2009) و سه بعد (Elmaloglou and Diamantopoulos, 2008) استفاده کرده‌اند.

در روش اجزای مرزی، دامنه حل مسئله به دو بخش داخلی و مرزی تقسیم‌بندی می‌شود. قسمت داخلی شامل متغیرهای ناشناخته و مرز مسئله حاوی مقادیر یا شرایط شناخته شده است. ایده روش اجزای مرزی این است که حل معادلات دیفرانسیل جزئی را بر حسب انتگرال‌های معینی بر روی مرز مسئله به‌جای حل مستقیم آن در داخل مرز بیان می‌کند. به‌طور خاص در معادله ریچاردز، روش اجزای مرزی می‌تواند برای حل پتانسیل فشاری و رطوبت در هر نقطه از دامنه خاک استفاده شود. شرایط مرزی معمولاً به‌صورت پتانسیل فشاری یا رطوبت در سطح خاک و در هر مرز دیگری که ممکن است در محدوده مورد مطالعه مسئله وجود داشته باشد، مشخص می‌شود. با استفاده از روش اجزای مرزی برای حل معادله ریچاردز، می‌توانیم یک تقریب عددی از رطوبت و پتانسیل فشاری در نقاط مختلف دامنه خاک به‌دست آوریم که می‌تواند برای تحلیل و پیش‌بینی حرکت آب در خاک‌های

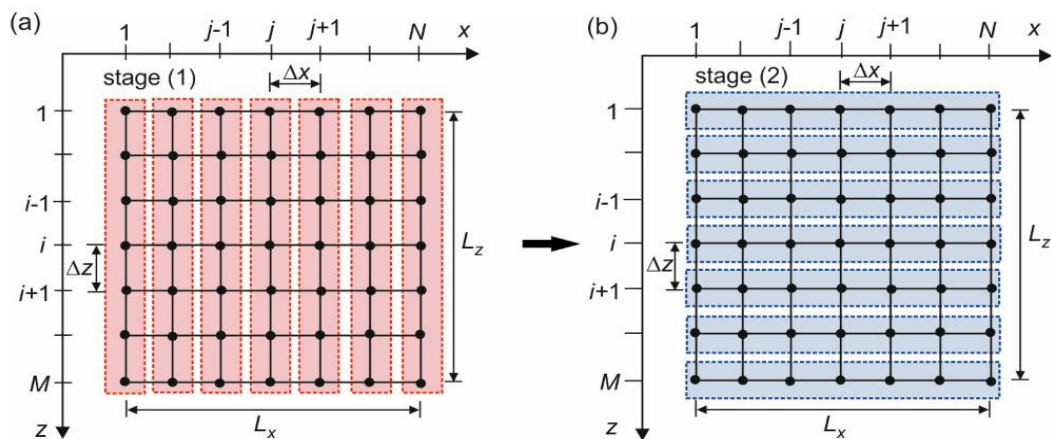
³ Global random walk

¹ Data-facilitated global Random Walk

² Adaptive linearization scheme

نمایش دقیقی از تغییرات سطح آب در خاک غیراشباع نسبت به روش‌های تحلیلی، داده‌های آزمایشگاهی و تفاضل محدود ارائه دهد می‌توان ادعا کرد که راه‌حل پیشنهادی می‌تواند جریان نفوذ آب در خاک غیراشباع را با دقت مناسبی مدل کند (Chali et al., 2023).

چالی و همکاران یک رویکرد تک بعدی برای حل عددی معادله ریچاردز با استفاده از روش پتروف گالرکین بدون مش^۱ و تبدیل کیرشرف ارائه کردند. نتایج مدل‌سازی با روش‌های حل تحلیلی، داده‌های آزمایشگاهی، تفاضل محدود و روش‌های عددی بدون مش مقایسه شد. با توجه به اینکه مدل پیشنهادی می‌تواند



شکل ۲- شبکه فضایی محاسباتی و طرح تقسیم ابعادی مرحله اول (a) در جهت z و مرحله دوم (b) در جهت x (Gasiorowski and Kolerski, 2020).

شبکه تعریف شوند. فرض عدم جریان در فاصله بین دو خط لترال به احتمال زیاد معتبر است؛ زیرا رطوبت خاک در این فاصله از خط لترال کم است. البته این فرض می‌تواند به دلیل ناهمگن بودن خاک نقض شود، چرا که در این شرایط یک قطره‌چکان نمی‌تواند به طور یکنواخت دو طرف خط لترال را خیس کند. همچنین تخصیص جریان از قسمت زیرین مساحت مدل‌سازی شده در صورت پایین آمدن سطح آب زیرزمینی در نتیجه زهکشی لزوماً معتبر نیست. همچنین با توجه به هندسه جریان فرض یک منبع خطی هنگامی که فاصله قطره‌چکان‌ها ۷۵ سانتی‌متر است، نمی‌تواند کاملاً معتبر باشد. تفاوت در الگوی رشد محصولات خاص نیز بر حرکت آب در خاک از طریق تأثیر آن بر گرادیان پتانسیل اثر می‌گذارد (Cooper, 1990). با توجه به این که دینامیک معادلات استفاده شده تجربی است؛ بنابراین انتظار نمی‌رود که کاملاً دقیق باشند. پارامترها در سراسر ناحیه مدل‌سازی شده ثابت فرض

شرایط مرزی در روش‌های حل عددی معادله ریچاردز

شرایط مرزی برای مسائل آبیاری قطره‌ای عموماً یک مرز بدون جریان یا زهکشی ثابت در زیر ناحیه ریشه و یک مرز فرضی بدون جریان در فاصله افقی بی‌نهایت از خط لترال که یک منبع خطی یا نقطه‌ای است در نظر گرفته می‌شود. سطح خاک نیز در صورت غیراشباع بودن به صورت مرز نیومن^۲ (بدون جریان) یا در صورت اشباع بودن به صورت مرز دیرچلت^۳ (بار ثابت) در نظر گرفته می‌شود. انبساط و انقباض ناحیه اشباع‌شده سطح خاک در نزدیکی قطره‌چکان نیز باید لحاظ شود که با در نظر گرفتن یک مرز متحرک به همراه خاک اشباع کافی برای جذب آب آبیاری انجام می‌شود (Cooper, 1990). در پلان عمودی نیمرخ خاک، ورودی‌ها و خروجی‌ها باید به طور پیوسته برای هر عنصر یا جزء

³ Dirichlet

¹ Meshless Petrov Galerkin method

² Neuman

مدل گاردنر بر ویژگی‌های خاک مؤثر بر جذب آب توسط ریشه گیاه تأکید کرده و منجر به اصطلاحاً رویکرد میکروسکوپی جذب آب شد (Gardner, 1960). این مدل میکروسکوپی هر ریشه مجزا را معادل یک استوانه بی‌نهایت طولانی با شعاع یکنواخت که دارای خاصیت جذب آب است در نظر می‌گیرد. در این مدل معادله جریان آب در خاک در حالت پایدار به صورت تحلیلی با فرض جریان شعاعی و نرخ جذب آب ریشه حل شده است. همچنین توزیع پتانسیل ماتریک آب خاک نیز در اطراف یک ریشه ایده‌آل محاسبه شده است (Vrugt et al., 2001a). این مفهوم در مقالات بعدی نیز توسعه یافت (Gardner, 1962; Gardner and Ehlig, 1964) و ثابت شد که بسیار دقیق است، اما فاقد کاربرد عملی است؛ زیرا هندسه سیستم ریشه بسیار پیچیده است و با گذشت زمان تغییر می‌کند. در نتیجه، بیشتر ترم‌های جذب آب ریشه با استفاده از رویکرد ماکروسکوپی به جای رویکرد میکروسکوپی توسعه یافتند. با این وجود، همه مدل‌های ماکروسکوپی جوهره بیش گاردنر را حفظ می‌کنند. در رویکرد ماکروسکوپی معادله ریچاردز، یک پارامتر تخلیه لحاظ شده است که نشان‌دهنده جذب آب توسط کل سیستم ریشه برای توصیف جریان آب چندبعدی انتقالی در خاک است (Clausnitzer and Hopmans 1994). مزیت اصلی این رویکرد این است که امکان ادغام مستقیم جذب آب توسط ریشه با جریان آب انتقالی و برهمکنش‌های طبیعی بین تعرق و جذب آب ریشه را فراهم می‌کند (Vrugt et al., 2001a).

جذب واقعی آب توسط ریشه از نظر مکانی نه تنها به توزیع تراکم ریشه بستگی دارد بلکه به عملکرد زمانی آن نیز وابسته است (Pages et al., 1989) که توسط در دسترس بودن آب خاک برای ریشه تعیین می‌شود. اهلرز و همکاران تراکم ریشه و جذب آب را با فرض شرایط حالت پایدار مرتبط کردند (Ehlers et al., 1991)؛ اما در توصیف جذب آب در خاک، سیستم ریشه بسیار ساده‌سازی شد و تنها به وسیله تراکم طول ریشه^۲ (RLD) و گاهی مقاومت ریشه همگن در برابر جریان آب توصیف گردید؛ اما داده‌های تجربی و محاسبات (Lafolie et al., 1991) نشان داد که توزیع مکانی ریشه‌ها در خاک تأثیر قابل توجهی بر جذب آب دارد. چرا که ریشه‌ها در جهات و فواصل مختلف، دارای سرعت رشد متفاوتی

می‌شوند و همچنین فرض می‌شود که معادلات ون‌گنوختن می‌توانند به صورت تابعی از رطوبت و هدایت هیدرولیکی خاک اندازه‌گیری شده باشند. به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی در حل‌های عددی به رفتار مرز متحرک سطح خاک که نواحی اشباع و غیراشباع را از هم جدا می‌کند، توجه زیادی می‌شود.

مدل‌های ریاضی با لحاظ جذب آب توسط ریشه و تبخیر از خاک

فرآیندهای نفوذ و توزیع آب در یک خاک دارای کشت، به نوع روش آبیاری، بافت و ساختمان خاک، الگوی توزیع ریشه در خاک و الگوهای جذب آب توسط ریشه و نرخ دبی آب ورودی به خاک بستگی دارد (Hopmans and Bristow 2002)؛ بنابراین، مدل‌های شبیه‌ساز حرکت آب در خاک باید توزیع‌های مکانی و زمانی جذب آب توسط ریشه گیاه را نیز در نظر بگیرند (Musters and Bouten, 1999). رشد ریشه تحت سامانه آبیاری قطره‌ای به حجم خاک خیس شده توسط قطره‌چکان‌ها محدود می‌شود و تراکم طول ریشه با عمق کاهش می‌یابد (Michelakis et al., 1993). سه عامل اصلی جذب آب توسط ریشه‌های گیاه از خاک را کنترل می‌کند که شامل ویژگی‌های خاک (نحوه پخش آب و هدایت هیدرولیکی خاک)، الگوی توزیع و رشد ریشه (نحوه گسترش در فضا و اتصالات بین ریشه‌ها) که به عنوان شبکه‌ای از اندام‌های جذب آب در نظر گرفته می‌شود و قابلیت جذب آب توسط ریشه‌ها که وابسته به سطح مشترک خاک و ریشه و مقاومت ریشه در برابر انتقال آب است. برای لحاظ کردن تأثیر جذب آب توسط ریشه گیاه بر رژیم‌های جریان غیراشباع در خاک، پارامتر تخلیه^۱ (S) در معادله ریچاردز اضافه می‌شود (معادله ۷):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla[K(h)\nabla h] - \frac{\partial K}{\partial z} - S \quad (7)$$

اکثر مدل‌هایی که جذب آب توسط ریشه را توصیف می‌کنند، تنها تعداد محدودی از ویژگی‌های فرآیند جذب آب را در نظر می‌گیرند و شرح مفصلی از سامانه ریشه در آن‌ها وجود ندارد (Molz, 1981).

² Root Length Density

¹ Sink term

آب توسط ریشه نیاز به داده‌های مکانی جذب آب توسط ریشه است که معمولاً وجود ندارد (Vrugt et al., 2001a).

المالوگلو و دیامانتوپولوس یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن جذب آب توسط ریشه ارائه کردند. این مدل به صورت عددی با روش ضمنی حل می‌شود که غیرخطی بودن معادله جریان و علاوه بر این پتانسیل استقرار یک لایه نازک آب در سطح خاک در طی فرآیند نفوذ را نیز در نظر می‌گیرد (Elmaloglou and Malamos, 2003). المالوگلو و ملاموس یک مدل تجربی را برای مواقعی که داده‌های آزمایشگاهی لازم برای تجزیه و تحلیل دقیق نفوذ چندبعدی در دسترس نباشند، ارائه کردند. این روش شامل دو رابطه تجربی ساده و وابسته به زمان بود: یک معادله توانی برای مرحله نفوذ که در هر دو جهت افقی و عمودی اعمال شد و یک معادله چندجمله‌ای برای مرحله بعد از پایان آبیاری که فقط برای مؤلفه عمودی اعمال شد تا نفوذ عمقی را محاسبه کند. مدل تجربی با یک مدل جریان دو بعدی که نفوذ موضعی از یک منبع خطی در سطح خاک را توصیف می‌کند و یک مدل جریان استوانه‌ای که نفوذ موضعی از یک منبع نقطه‌ای در سطح خاک را به همراه تبخیر و جذب آب توسط ریشه‌ها توصیف می‌کند، مقایسه شد. نتایج این دو روش تقریباً منطبق بر هم بود (Elmaloglou and Malamos, 2005; 2007).

یاداو و همکاران یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان آب در پروفایل خاک لایه‌ای با لحاظ رشد گیاه ارائه کردند. برای تعیین جذب آب توسط ریشه در یک محیط کم رطوبت یک مکانیسم پویای جبران‌کننده ریشه^۲ برای الگوی توزیع غیریکنواخت ریشه مورد استفاده قرار گرفت. مکانیزم پویای جبران‌کننده ریشه استراتژی است که توسط گیاهان برای تنظیم جذب آب در پاسخ به توزیع غیریکنواخت ریشه‌ها در خاک استفاده می‌شود. در الگوی توزیع غیریکنواخت ریشه، برخی از قسمت‌های خاک ممکن است مرطوب یا خشک‌تر از قسمت‌های دیگر باشد و این می‌تواند بر میزان آب مصرفی گیاه تأثیر بگذارد. مکانیزم پویای جبران ریشه با تنظیم جذب آب توسط قسمت‌های مختلف سیستم ریشه به رفع

هستند و حتی تفاوت‌های مقطعی را در جذب، بسته به سن ریشه و مکان آن نشان می‌دهند. تکثیر نامنظم سیستم ریشه می‌تواند منجر به اختلاف بین RLD و جذب واقعی آب و مواد مغذی توسط ریشه شود؛ بنابراین مدل‌های جذب آب و مواد مغذی توسط ریشه مبتنی بر تراکم طول ریشه زمانی که اختلاف زیادی بین تراکم طول ریشه و جذب واقعی آب توسط ریشه وجود داشته باشد، موفق نخواهند بود (Coelho and Or, 1999). علاوه بر این، توانایی ریشه‌ها برای جذب آب ممکن است در مکان و زمان به دلیل مقاومت سطحی در برابر انتقال آب بین خاک و ریشه یا به دلیل تغییر در خواص فیزیولوژیکی خاک در امتداد ریشه، تکامل یابد (Varney and Canny, 1993). یک بحث مفصل در مورد جذب آب توسط ریشه تحت سامانه آبیاری قطره‌ای توسط مولوا و اور ارائه شده است (Mmolawa and Or, 2000b).

اگرچه جریان آب خاک در ناحیه غیراشباع معمولاً در فضای یک، دو و سه بعدی شبیه‌سازی می‌شود، اما جذب آب توسط ریشه فقط تابعی از بعد عمودی است (Vrugt et al., 2001a) و مدل‌های جذب موجود اکثراً یک بعدی هستند (Jarvis, 1989) و تغییرات جذب آب توسط ریشه با عمق خاک را توصیف کرده و درعین حال امکان کاهش جذب در نتیجه تنش آبی خاک را فراهم می‌کنند. این مدل‌ها برای گیاهانی که دارای الگوی جذب آب یکنواخت مکانی هستند مفید است. برای محصولات ردیفی و خطوط کاشت درختان، مدل‌سازی دو بعدی بهتر خواهد بود (Vrugt et al., 2001a). مدل‌های دو بعدی ارائه شده شامل مدل‌های نیومن و همکاران، واریک و همکاران، کوئلیو و اور و وروگت و همکاران می‌باشند (Neuman et al., 1975; Warrick et al., 1980; Coelho, 1999; Vrugt et al., 2001b). برای درختانی مانند سیب و بادام در کشت‌های تکی^۱، فرآیند جذب آب پیچیده است و بنابراین مدل‌سازی سه بعدی مناسب‌تر به نظر می‌رسد (Vrugt et al., 2001a). مدل‌هایی مانند HYDRUS-3D امکان شبیه‌سازی جذب آب توسط ریشه را به صورت چندبعدی فراهم می‌کند. با این حال، معمولاً برای پشتیبانی از پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی چند بعدی جذب

² Root compensation mechanism

¹ Monocultures

قطره‌های طوری طراحی می‌شود که نرخ دبی قطره‌چکان برابر ظرفیت نفوذ آب در خاک باشد.

سپاسخواه و چیت‌ساز معادله‌ای را برای محاسبه شعاع پیاز رطوبتی به‌طور خاص برای مدل سه بعدی گرین-آمپت ارائه کردند. معادله تجربی با استفاده از تحلیل رگرسیون چندگانه براساس داده‌های اندازه‌گیری شده مقادیر مختلف شعاع پیاز رطوبتی برای خاک‌های مختلف (با هدایت هیدرولیکی اشباع متفاوت) و قطره‌چکان‌ها با دبی‌های مختلف، توسعه داده شد. با این حال، جزئیات روش نامشخص بود و به نظر نمی‌رسد که معادله نتایج خوبی داشته باشد (Sepaskhah and Chitsaz, 2004). گودیش و مونوز-کارپنا معادله‌ای را برای تعیین شعاع پیاز رطوبتی بر اساس تعمیم معادله فیلیپ به‌عنوان تابعی از سرعت جریان خروجی از قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی اشباع و میزان مکش در جبهه رطوبتی پیشنهاد کردند. هر دو معادله فیلیپ و معادله پیشنهادی برای طیف گسترده‌ای از خاک‌ها مقایسه شدند. نتایج نشان داد که روش دوم یک روش مفید برای محاسبه پارامتر شعاع پیاز رطوبتی برای استفاده در مدل سه بعدی گرین-آمپت است (Gowdiah and Munoz-Carpena, 2009).

مدل‌های تجربی توسعه‌یافته جهت تعیین ابعاد الگوی خیس‌شدگی خاک

مدل‌های تجربی مختلفی برای تعیین پارامترهایی مانند رطوبت خاک، شعاع پیاز رطوبتی، حجم پیاز رطوبتی، عمق خیس‌شدگی، مرزها و شکل حجم خاک خیس‌شده و غیره به‌صورت تابعی از حجم آب مصرفی، تخلخل خاک و ویژگی‌های زودیافت خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع یا نفوذ طولانی مدت با روش‌های تحلیل رگرسیونی، آنالیز ابعادی و شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از مشاهدات میدانی توسعه داده شده‌اند. مدل‌های تجربی زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که: (الف) اطلاعات مربوط به ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برای مدل‌های عددی و تحلیلی مورد نیاز است در دسترس نباشد و (ب) زمانی که

این مشکل کمک می‌کند. این مکانیسم به گیاه اجازه می‌دهد تا مصرف آب خود را بهینه کند و در شرایط تنش آبی زنده بماند. معادله حاکم بر جریان آب در خاک با لحاظ تابع جذب آب توسط ریشه به‌صورت عددی با روش تفاضل محدود ضمنی همراه با تکنیک تکرار پیکارد^۱ حل شد. این مدل ابتدا برای یک پروفایل خاک لایه‌ای بایر با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده عددی موجود در مقالات مورد آزمایش قرار گرفت و سپس یک تابع غیرخطی برای جذب آب توسط ریشه‌ها در معادله جریان گنجانده شد. این مدل در نهایت برای یک مزرعه گندم دیم با استفاده از مدل رشد پویا ریشه اعمال گردید. شبیه‌سازی با در نظر گرفتن مکانیزم پویای جبران‌کننده ریشه تطابق بهتری با داده‌های مشاهده‌شده در مقایسه با نتایج مدل به‌دست‌آمده بدون در نظر گرفتن مکانیزم پویای جبران‌کننده ریشه نشان داد (Yadav et al., 2009).

مدل‌های مبتنی بر نفوذ گرین-آمپت برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک

راه‌حل‌های عددی معادله ریچاردز با وجود دقت بالا از نظر محاسباتی پیچیده هستند، به داده‌های زیادی از ویژگی‌های خاک نیاز دارند و عموماً شامل گسسته‌سازی مکانی و زمانی دقیق می‌باشند. به همین دلیل، رویکردهای فیزیکی تقریبی برای مدل‌سازی نفوذ و توزیع مجدد آب در خاک توسعه داده شده‌اند. یکی از این رویکردها مدل سه بعدی گرین-آمپت^۲ (3DGA) است که مبتنی بر همان مفروضات و روش‌شناسی اولیه مدل اصلی گرین و آمپت می‌باشد (Green and Ampt, 1911) با این تفاوت که برای شبیه‌سازی جریان آب سه بعدی در خاک تحت سامانه آبیاری با منبع نقطه‌ای فرمول‌بندی شده است. این مدل برای شرایطی که رطوبت خاک در محدوده پیاز رطوبتی در حد اشباع یا بسیار نزدیک به اشباع باشد معتبر است، به این معنی که نرخ دبی قطره‌چکان باید با میانگین ظرفیت نفوذ خاک برابر باشد. این فرض برای سامانه آبیاری قطره‌ای منطقی است؛ زیرا اغلب سامانه آبیاری

² Green-Ampt

¹ Picard Iteration

سادگی معادلات ریاضی از اهمیت اولیه برخوردار است.

کندلوس و سیمونک عملکرد مدل عددی HYDRUS-2D، مدل تحلیلی WetUp و سه مدل تجربی ارائه شده توسط Amin and Ekhmaj (1986)، Schwartzman and Zur (2006) و Kandelous et al. (2008) را برای برآورد ابعاد الگوی خیس شدگی در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی و سطحی مورد بررسی قرار دادند (Kandelous and Simunek, 2010a). مقایسه اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای با مقادیر شبیه‌سازی شده مدل‌ها نیز نشان داد که مدل عددی HYDRUS-2D و مدل تجربی Amin and Ekhmaj (2006) برآوردهای بهتری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه می‌کنند. چرا که یکی از ورودی‌های مدل HYDRUS-2D پارامترهای هیدرولیکی خاک است که بیانگر ویژگی‌های خاک مورد نظر می‌باشد و مدل تجربی Amin and Ekhmaj (2006) نیز از پارامتر $\Delta\theta$ که بیانگر تغییرات متوسط رطوبت خاک است استفاده می‌کند. چندین مدل ساده که برای تعیین الگوهای خیس شدگی خاک بر اساس بیلان حجم و هندسه جریان توسعه یافته است در جدول (۱) ارائه شده است.

مدل‌های شبکه عصبی - مصنوعی (ANN) برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک

شبکه‌های عصبی - مصنوعی^۱ (ANN) با موفقیت برای مدل‌سازی توزیع رطوبت در خاک استفاده شده‌اند. ANN نوعی الگوریتم یادگیری ماشینی هستند که قادر به یادگیری روابط پیچیده بین ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشند. در مورد توزیع رطوبت در خاک، ورودی‌ها می‌توانند عواملی مانند توپوگرافی زمین، بافت خاک، پوشش گیاهی، بارش و دما باشند، در حالی که خروجی، میزان رطوبت خاک پیش‌بینی شده در قسمت‌های مختلف نیمرخ خاک است.

برای ساخت یک مدل ANN برای بررسی توزیع رطوبت در خاک، داده‌های مربوط به میزان رطوبت خاک و متغیرهای ورودی مربوطه باید جمع‌آوری شوند. سپس این مجموعه داده را می‌توان

به دو مجموعه داده آموزشی و داده آزمایشی تقسیم‌بندی کرد. مجموعه داده آموزشی برای آموزش ANN از طریق تنظیم وزن و بایاس نورون‌ها استفاده می‌شود تا زمانی که مدل بتواند به طور دقیق میزان رطوبت خاک را به ازای متغیرهای ورودی پیش‌بینی کند. مجموعه داده آزمایشی برای ارزیابی عملکرد مدل ANN استفاده می‌شود. در واقع ANN مدل‌های ریاضی هستند که از عناصر ساده و متراکم بهم پیوسته به نام نورون‌ها تشکیل شده‌اند که معمولاً به ترتیب در لایه‌های مختلف قرار می‌گیرند. یک ANN سیگنال‌ها را از طریق واحدهای ورودی دریافت می‌کند و این سیگنال‌ها منتشر شده و از طریق شبکه به نورون (های) خروجی تبدیل می‌شوند. ساختار داخلی ANN به این صورت است که ANN آموزش داده می‌شود تا بتواند پاسخ‌های مشاهداتی سامانه در ازای ورودی‌های معین را تکرار کند. پایگاه‌های داده مورد استفاده برای آموزش ANN اکثراً از نتایج شبیه‌سازی‌های مدل عددی ساخته شده‌اند (Schmitz et al., 2002; Lazarovitch et al., 2009). ANN بین نقاط مشخص در فضای پاسخ سامانه درونیابی می‌کند تا برآوردهایی از توزیع مکانی رطوبت خاک برای مقادیر ورودی که در پایگاه داده آموزشی موجود نیست، ارائه دهد.

این کار در سه گام مختلف به ترتیب شبیه‌سازی نفوذ با استفاده از یک مدل عددی برای شرایط مرزی چندگانه و مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک و جمع‌آوری مجموعه داده‌ها، آموزش ANN با استفاده از مجموعه داده‌های آموزشی حاصل از شبیه‌سازی مدل عددی و تست عملکرد ANN با استفاده از مجموعه داده‌های آزمایشی حاصل از شبیه‌سازی مدل عددی انجام می‌شود. گام آخر یک آزمایش کور با استفاده از شرایط مرزی و مقادیر پارامترهایی است که برای آموزش ANN استفاده نشده است. پس از آن که ANN آموزش دید، مجموعه‌ای از خروجی‌ها (به‌عنوان مثال، لحظه‌های اولیه جبهه خیس شدگی خاک در نتیجه نفوذ آب از قطره‌چکان سطحی) را بر اساس مجموعه‌ای از ورودی‌ها (ویژگی‌های خاک و زمان و دبی قطره‌چکان) برآورد می‌کند؛ بنابراین، ANN تقریبی از مدل‌های عددی هستند که نفوذ آب در خاک را تحت سامانه آبیاری قطره‌ای توصیف می‌کنند. تمام

¹ Artificial Neural Networks

مدل‌سازی‌های عددی از قبل انجام می‌شود و از ANN برای ارائه سریع نتایج استفاده می‌گردد. شبکه‌های ANN با موفقیت در طیف وسیعی از کاربردهای فیزیک خاک نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند مانند برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (Minasny and McBratney, 2002; Minasny et al., 2004) ارتباط بین ترکیب خاک با کاربری زمین (Somaratne et al., 2005)، تخمین میزان رطوبت خاک (Hongli and William, 2004) و شبیه‌سازی انتقال املاح خاک (Li et al., 2004; Yoon et al., 2007).

اشمیتز و همکاران پیشنهاد استفاده از ANN را برای بررسی جریان آب خروجی از یک منبع نقطه‌ای سطحی ارائه کردند. آن‌ها از یک مدل جریان زیرسطحی عددی با مبنای فیزیکی و ANN برای حل مسئله در دو گام کاملاً مجزا استفاده کردند. در گام اول از مدل عددی برای محاسبه تعداد زیادی پروفیل خیس شده خاک تحت شرایط اولیه و مرزی مختلف استفاده شد. پایگاه داده حاصل از مقادیر ورودی یا خروجی برای آموزش ANN استفاده گردید. در گام دوم، از ANN که به‌طور کامل آموزش دیده است برای تخمین موقعیت جبهه رطوبتی خاک استفاده شد (Schmitz et al., 2002).

لی و همکاران از داده‌های تجربی آزمایشگاهی برای آموزش ANN به‌منظور تخمین غلظت نیترات در خاک تحت یک منبع نقطه‌ای سطحی استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ANN آموزش دیده از دقت معقولی برخوردار است و استفاده از ANN می‌تواند بر پیچیدگی غیرخطی زیاد سامانه جریان غلبه کند (Li et al., 2004). اخماج و همکاران از تکنیک ANN برای تعیین الگوی خیس‌شدگی خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای نقطه‌ای استفاده کردند (Ekhmaj et al., 2007). برای تولید و ارزیابی مدل ANN، مجموعه داده‌های مستقل از داده‌های منتشر شده موجود توسط پژوهشگران به‌دست آمد (Moncef et al., 2002; Li et al., 2003, 2004; Palomo et al., 2002; Amin and Ekhmaj, 2006). نتایج حاصل از روش ارائه شده با درصد تطبیق بالا برای هر دو داده‌های تمرینی و آزمایشی عمق و عرض پیاز رطوبتی تایید شد. هینل و همکاران از نتایج مدل‌های عددی برای سناریوهای نفوذ مختلف جهت آموزش ANN استفاده کردند و این امکان را برای کاربر فراهم کردند که از مزایای مدل‌سازی عددی بدون نیاز به اجرای آن بهره‌برد (Hinnel et al., 2010). در جدول (۲) خلاصه‌ای از روش‌های مدل‌سازی توزیع رطوبت در خاک به همراه مزایا و معایب آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۱- معادلات تجربی ارائه شده برای برآورد الگوی خیس شدگی خاک در سامانه آبیاری قطره‌ای

منبع	نوع سامانه آبیاری	بافت خاک	شرایط و محدودیت کاربرد	روش مورد استفاده	معادله تجربی ارائه شده	پارامترهای معادله
Roth, (1974)	نفوذ از یک منبع نقطه‌ای	ریز	خاک بدون رطوبت اولیه (خشک) و زمان‌های کوتاه کاربرد آب	-	$r = \left(\frac{3qt}{2\pi(\theta_f - \theta_i)} \right)^{\frac{1}{3}}$	شعاع خیس شده، مقدار دبی حجمی، زمان کاربرد، مقدار رطوبت حجمی اولیه و نهایی خاک
Ben-Asher et al. (1986)	نفوذ از یک منبع نقطه‌ای	-	بدون لحاظ کردن جذب آب توسط ریشه، محدودیت کوتاه بودن زمان	-	$R(t) = \left(\frac{1.5Qt}{\pi\Delta\theta} \right)^{\frac{1}{3}}$	شعاع موثر نیمکره خیس شده، مقدار دبی حجمی، زمان کاربرد، متوسط رطوبت خاک و رطوبت حد اشباع خاک
Schwartzman and Zur (1986)	سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی	-	لحاظ نکردن پارامتر رطوبت اولیه خاک	آنالیز ابعادی	$W = 1.82(V_w)^{0.22}(K_s Q^{-1})^{-0.17}$ $Z = 2.54(V_w)^{0.63}(K_s Q^{-1})^{0.45}$ $R = 0.2476\Delta\theta^{-0.5626}V^{0.2686}Q^{-0.0028}(K_s)^{-0.0344}$	عمق پیاز رطوبتی، قطر حجم خیس شده خاک، دبی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و کل آب موجود در حجم خاک خیس شده
Amin and Ekhmaj (2006)	قطره‌چکان سطحی	-	در نظر گرفتن شاخص رطوبت خاک	رگرسیون غیرخطی	$Z = 2.0366\Delta\theta^{-0.383}V^{-.365}Q^{-0.101}(K_s)^{-0.195}$	شعاع خیس شدگی سطح خاک، عمق پیش‌روی جبهه رطوبتی، متوسط تغییرات رطوبت حجمی خاک، کل حجم آب کاربردی، دبی قطره‌چکان و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک
Singh et al. (2006)	آبیاری قطره‌ای زیرسطحی	لوم شنی	عدم لحاظ رطوبت اولیه نیمرخ خاک و محدودیت کوتاه بودن زمان	آنالیز ابعادی	$W = 3.27V^{0.44} \left(\frac{K_s}{qz} \right)^{-0.06}$ $D = 3.86V^{0.31} \left(\frac{K_s}{qz} \right)^{-0.19}$	عمق و عرض پیاز رطوبتی، عمق نصب لترال، کل حجم آب خروجی در واحد طول لترال، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، دبی قطره‌چکان در واحد طول لترال
Kandelous et al. (2008)	آبیاری قطره‌ای زیرسطحی	لوم رسی	نیاز به صحت‌سنجی با داده‌های مزرعه‌ای	آنالیز ابعادی	$W = 10.96V^{0.526} \left(\frac{K_s}{qz} \right)^{0.026}$ $Z_+ = 7.66V^{0.344} \left(\frac{K_s}{qz} \right)^{-0.156}$ $Z_- = 7.67V^{0.333} \left(\frac{K_s}{qz} \right)^{-0.167}$ $d = q^{0.543}K_s^{0.772}t^{0.419}\Delta\theta^{-0.687}\rho_b^{0.305}$	عرض خیس شدگی عمق خیس شده در بالای قطره‌چکان، عمق خیس شده در پایین قطره‌چکان، کل حجم آب خروجی در واحد طول لترال، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، دبی قطره‌چکان در واحد طول لترال و عمق نصب لترال
Malek and Peters (2011)	آبیاری قطره‌ای سطحی	لوم رسی	لحاظ کردن پارامتر چگالی ظاهری خاک و رطوبت اولیه خاک	آنالیز رگرسیونی	$Z = q^{0.398}K_s^{0.208}t^{0.476}\Delta\theta^{-1.2537}\rho_b^{0.445}$	عمق خیس شدگی پیاز رطوبتی، عرض خیس شدگی سطح خاک، دبی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی خاک، متوسط رطوبت حجمی خاک، مدت زمان آبیاری و چگالی ظاهری خاک

Ismail et al. (2014)	آبیاری قطره‌ای سطحی در شرایط پالسی	شنی	شرایط جریان پالسی	آنالیز ابعادی	$D = 1.202(K_s)^{-0.2}T^{0.2}(Q_p)^{0.4} CR^{0.369}$ $Z = 1.183(K_s)^{0.196}T^{0.465}(Q_p)^{0.267} CR^{0.295}$	عمق و عرض پیاز رطوبتی برای شرایط جریان پالسی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، مدت زمان آبیاری، دبی قطره‌چکان در شرایط پالسی و نسبت مدت زمان فاز آبیاری به کل زمان آبیاری
کریمی و همکاران (۱۳۹۳)	سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی	سنگین، متوسط و سبک	لحاظ کردن شرایط جریان پالسی و در نظر گرفتن الگوی خیس شده بالا و پایین قطره‌چکان	آنالیز ابعادی	$A_d = 9.752 (K_s)^{0.143} (Q)^{0.619} (t)^{0.762}$ $A_d = 4.452 (K_s)^{0.162} (Q)^{0.612} (t)^{0.775}$ $A_{up} = 3.714 (K_s)^{0.12} (Q)^{0.626} (t)^{0.747}$ $A_{up} = 8.723 (K_s)^{0.354} (Q)^{0.548} (t)^{0.903}$	سطح خیس شده جبهه حرکت آب در خاک بالا و پائین موقعیت نصب قطره‌چکان، زمان آبیاری، دبی قطره‌چکان و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک
Al-Ogaidi et al. (2016)	آبیاری قطره‌ای سطحی	دو بافت همگن (شنی و رسی) و دو نیمرخ خاک لایه‌بندی شده (۲۰ سانتی‌متر خاک شن بر روی ۴۰ سانتی‌متر خاک رسی و برعکس)	رگرسیون غیرخطی	رگرسیون غیرخطی	$R_o = at^{a_1}q^{a_2}\rho_b^{a_3}\theta_1^{a_4}K_s^{a_5}S^{a_6}Si^{a_7}C^{a_8}$ $D = bt^{b_1}q^{b_2}\rho_b^{b_3}\theta_1^{b_4}K_s^{b_5}S^{b_6}Si^{b_7}C^{b_8}$ $R_o = ct^{c_1}q^{c_2}\left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_3}\left(\frac{\theta_{i1}}{\theta_{i2}}\right)^{c_4}\left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{c_5}\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_6}\left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{c_7}\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8}$ $D = dt^{d_1}q^{d_2}\left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{d_3}\left(\frac{\theta_{i1}}{\theta_{i2}}\right)^{d_4}\left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{d_5}\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{d_6}\left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{d_7}\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{d_8}$	شعاع خیس شدگی در سطح خاک و عمق پیاز رطوبتی در خاک همگن و لایه‌بندی شده، زمان آبیاری، دبی قطره‌چکان، رطوبت اولیه خاک، چگالی ظاهری خاک و درصد شن، سیلت و رس خاک
محمدبیگی و همکاران (۱۳۹۵)	آبیاری قطره‌ای پالسی و پیوسته	سنگین، متوسط و سبک	لحاظ کردن شرایط جریان پالسی و عدم در نظر گرفتن پارامتر بیانگر مدیریت پالسی	آنالیز ابعادی	$D_c = 9.15(K_s)^{0.74}q^{0.0755}t^{0.85}$ $Z_c = 11.89(K_s)^{0.7}q^{0.1}t^{0.8}$ $D_p = 9.21(K_s)^{0.73}q^{0.09}t^{0.82}$ $Z_p = 13.22(K_s)^{0.715}q^{0.095}t^{0.81}$	عمق و عرض پیاز رطوبتی خاک در شرایط آبیاری پیوسته و پالسی، دبی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی خاک، حجم آب نفوذ یافته در خاک و زمان آبیاری
محمدی و همکاران (۱۴۰۰)	آبیاری قطره‌ای سطحی پالسی	رسی	لحاظ کردن شرایط جریان پالسی	آنالیز ابعادی	$W = 10.777V^{0.6682} PR^{-0.3318}\left(\frac{K_s}{q}\right)^{0.5023}$ $D = 10.716V^{0.7927} PR^{-0.2073}\left(\frac{K_s}{q}\right)^{0.6891}$	عمق و عرض پیاز رطوبتی خاک تحت آبیاری قطره‌ای پالسی، دبی قطره‌چکان، حجم آب کاربردی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و پارامتر نسبت پالسی

جدول ۲- مزایا و معایب روش‌های مدل‌سازی توزیع رطوبت در خاک

مدل‌سازی توزیع رطوبت در خاک	روش‌های حل معادلات	مزایا	معایب
معادله ریچارد	تحلیلی	<p>۱. قابلیت بررسی آن‌ها جهت درک رفتار سامانه جریان و قابلیت بیان آن‌ها به صورت بدون بعد.</p> <p>۲. وجود رابطه مستقیم بین پارامترهای ورودی و خروجی.</p> <p>۳. آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی و خروجی مدل تحلیلی.</p> <p>۴. نیاز به تعداد پارامترهای کم برای توصیف و تحلیل مسائل.</p> <p>۵. ارائه رابطه مستقیم بین پارامترهای ورودی و شکل حاصل از حجم خاک خیس شده.</p> <p>۶. ارائه چارچوب کلی جهت تسهیل فرمول‌بندی طراحی و دستورالعمل‌های مدیریتی.</p> <p>۷. داشتن قابلیت‌های پیش‌بینی، در حالی که مدل‌های عددی اغلب فقط در همان مورد شبیه‌سازی شده اعمال می‌شوند (Leij et al., 2000).</p>	<p>۱. در نظر گرفتن دامنه جریان همگن با هندسه نسبتاً ساده؛</p> <p>۲. فرضیات محدودکننده مربوط به وضعیت و موقعیت منبع خروج آب؛</p> <p>۳. خطای مربوط به فرآیند خطی‌سازی و چندین فرض ساده‌کننده در مورد شرایط مرزی خاک؛</p> <p>۴. در نظر گرفتن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک همگن؛</p> <p>۵. بسیاری از راه‌حل‌های تحلیلی منجر به فرمول‌بندی‌های نسبتاً پیچیده‌ای می‌شوند که شامل سری‌ها و یا انتگرال‌های بی‌نهایت هستند و باید به صورت عددی ارزیابی شوند که نشان‌دهنده ابهاماتی در مزیت ادعایی دقت روش‌های تحلیلی نسبت به روش‌های عددی است (Simunek, 2005).</p>
	نیمه‌تحلیلی	<p>۱. برای طیف وسیع‌تری از مسائل قابل استفاده هستند.</p>	-
	عددی	<p>۱. انعطاف‌پذیرتر هستند.</p> <p>۲. تحت شرایط سامانه پیچیده، خاک ناهمگن متوسط، شرایط اولیه متغیر، شرایط مرزی غیرثابت و مرزهای نامنظم مورد استفاده قرار گیرند.</p> <p>۳. بر خطی‌سازی معادله ریچاردز متکی نیستند و می‌توانند توابع هدایت هیدرولیکی و منحنی نگهداشت واقعی‌تری مانند تابع ون‌گنوختن - معلم (Mualem 1976؛ Mualem & Genuchten, 1980) را در نظر بگیرند.</p>	<p>۱. عموماً از نظر محاسباتی فشرده هستند،</p> <p>۲. به داده‌های گسترده ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نیاز دارند،</p> <p>۳. شامل پارامترسازی و گسسته‌سازی مکانی و زمانی دقیق می‌شوند که می‌تواند منجر به خطا شود (Skaggs & Khaleel, 1982; Ogden and Saghafian, 1997).</p> <p>۴. در برخی شرایط می‌توانند باعث ایجاد مشکلات ناپایداری و خطاهای همگرایی در حل شوند (Vogel et al., 2001; Celia et al., 1990; Claudio and Putti, 1994; Miller et al., 1998).</p> <p>۵. بررسی نادرست شرایط مرزی در سطح خاک (Lafolie et al. 1989a, b).</p> <p>۶. روش‌های حل عددی مفروضات کمتری دارند، اما قدرت محاسباتی قابل توجهی نیاز دارند.</p> <p>۷. کاربرها باید هنر استفاده از مفروضات آن را داشته باشند (Mansell et al., 2002).</p> <p>۸. برای خاک‌هایی با هدایت هیدرولیکی پایین، یعنی خاک‌های ریزبافت یا برای شبیه‌سازی‌هایی با نرخ دبی جریان بالا، ممکن است لازم باشد شرایط مرزی بالادست نوارهای آبیاری قطره‌ای بهبود یابد.</p> <p>۹. به هنگام آبیاری در خاکی با نفوذپذیری کم، همراه با اشباع شدن خاک فشار مثبت قابل توجهی در اطراف نوار آبیاری قطره‌ای ایجاد می‌شود. جریان آب باید در پاسخ به این افزایش فشار کاهش یابد، نه اینکه ثابت باقی بماند. شرایط مرزی جریان ثابت در مدل HYDRUS-2D باعث می‌شود با افزایش فشار در مرز نوار آبیاری قطره‌ای، جریان آب وارد شده به مدل ثابت باشد. این افزایش فشار مرزی از نظر فیزیکی غیرواقعی است و اگر افزایش فشار بیش از حد زیاد شود، ممکن است منجر به مشکلات حل عددی گردد (Skaggs et al, 2004).</p>

مروری بر انواع روش‌های مدل‌سازی توزیع رطوبت در خاک... ۹۷

<p>۱۰. اجرای مدل HYDRUS-2D در خاک رسی به دلیل مشکلات ناپایداری عددی دشوار است. در چنین خاک‌هایی، گسترش شعاعی پیاز رطوبتی در زمان‌های اولیه شبیه‌سازی بیش از حد برآورد می‌شود.</p>			
<p>۱. نیاز به آزمایشات گسترده برای صحت‌سنجی اعتبار آن، ۲. شرط برابری دبی خروجی قطره‌چکان با میانگین ظرفیت نفوذ آب در خاک، ۳. ثابت فرض شدن شعاع پیاز رطوبتی نسبت به زمان، ۴. حساسیت بالا نسبت به هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت اولیه خاک، ۵. عدم صحت فرض اولیه حرکت عمودی جبهه رطوبتی به صورت یک بدنه مرطوب موازی با سطح خاک به سمت پایین با سرعتی برابر با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، ۶. عدم کارایی مدل در مناطق شیب‌دار (Chen and Young, 2006).</p>	<p>۱. سادگی، ۲. کارایی محاسباتی در مقایسه با راه‌حل‌های عددی معادله ریچاردز، ۳. مبنای فیزیکی، ۴. دقت؟؟؟ ۵. حداقل تعداد پارامترهای مورد نیاز که قابل محاسبه از کلاس‌های بافت خاک است. ۶. توانایی آن در ارائه نتایج خوب برای نفوذ در سامانه آبیاری با منبع نقطه‌ای</p>	-	<p>معادله نفوذ گرین-آمپت</p>
<p>۱. شبکه‌های عصبی - مصنوعی اطلاعات تحلیلی در مورد رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ارائه نمی‌دهند. ۲. شکل بهینه پارامترهای طراحی شبکه (مانند تعداد نورون‌ها در لایه پنهان) می‌تواند در هر کاربرد متفاوت باشد و نمی‌توان آن را به صورت نظری تعریف کرد، به همین دلیل است که معمولاً با استفاده از رویکردهای آزمون و خطا تعیین می‌شوند (de Vos and Rientjes, 2005). ۳. آموزش پارامترهای شبکه به دلایل زیر دشوار است: (۱) الگوریتم‌های بهینه‌سازی اغلب قادر به یافتن بهینه سراسری در فضاهای پارامتر پیچیده و با ابعاد بالا نیستند، (۲) اثر پارامترسازی بیش از حد ممکن است رخ دهد و (۳) حداقل شدن خطا در مرحله آموزش لزوماً به معنای عملکرد عملیاتی خوب (de Vos and Rientjes, 2005) نیست و نیاز به تعداد زیادی داده‌های مشاهده‌ای است (David and Jose, 2010). ۴. برای به کارگیری صحیح تکنیک‌ها به دانش تخصصی نیاز است. ۵. روابط فقط در محدوده داده‌های مورد استفاده برای صحت‌سنجی مدل معتبر هستند، پیش‌بینی برخی از متغیرها ممکن است خارج از این محدوده باشد (David and Jose, 2010).</p>	<p>۱. شبکه‌های عصبی - مصنوعی قادرند روابط غیرخطی بین رطوبت خاک و سایر عوامل محیطی را شبیه‌سازی کنند. ۲. شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند با استفاده از داده‌های گذشته برای پیش‌بینی دقیق توزیع رطوبت در خاک آموزش ببینند. ۳. شبکه‌های عصبی - مصنوعی می‌توانند به طور موثر بین ویژگی‌های داده مربوط و نامربوط تمایز قائل شوند. ۴. مدل‌های شبکه عصبی - مصنوعی لزوماً به فرضیات یا قیود یا ساختارهای حل شده قبلی نیاز ندارند (French et al., 1992). ۵. شبکه‌های عصبی - مصنوعی نیازهای محاسباتی نسبتاً کمی دارند و به دلیل ساختار مدل فشرده و انعطاف‌پذیرشان، می‌توانند به راحتی با سایر تکنیک‌ها ادغام شوند. ۶. هنگامی که یک عنصر از شبکه عصبی - مصنوعی از کار می‌افتد، به دلیل ماهیت موازی مشکلی ایجاد نمی‌شود (David and Jose, 2010). ۷. شبکه عصبی - مصنوعی به دلیل یادگیری نیاز به برنامه‌ریزی مجدد ندارد (David and Jose, 2010).</p>		<p>شبکه‌های عصبی - مصنوعی</p>

نرم افزار توسعه یافته جهت بررسی جریان آب در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای

با گذشت زمان درک مفهومی و توصیف ریاضی جریان آب در خاک، انتقال املاح یا مواد مغذی و جذب آب توسط ریشه تحت سامانه آبیاری قطره‌ای در بسته‌های نرم‌افزاری مختلف ارائه شده است. سیمونک برخی از نرم‌افزارهای توسعه یافته برای جریان اشباع متغیر را ارائه کرد (Simunek, 2005). سیمونک و همکاران یک مدل عددی دو بعدی همه منظوره و کاربرپسند، معروف به SWMS 2D (شبیه‌ساز حرکت آب و انتقال املاح در دو بعد)، که اخیراً به نام HYDRUS-2D شناخته می‌شود، توسعه دادند (Simunek et al., 1999). HYDRUS-2D نرم‌افزار کامپیوتری مبتنی بر ویندوز است که از روش اجزای محدود گالرکین بر اساس طرح تکراری بقای جرم ارائه شده توسط سلیا و همکاران استفاده می‌کند (Celia et al., 1990). نرم‌افزار HYDRUS-2D جهت در نظر گرفتن بعد سوم به صورت نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D به‌روزرسانی شد. این نرم‌افزار اجرای سه بعدی جریان آب متقارن محوری، انتقال املاح و جذب آب و مواد مغذی ریشه را بر اساس حل عددی اجزای محدود معادلات جریان امکان‌پذیر می‌کند. کد کامپیوتری HYDRUS از معادله ریچاردز برای جریان اشباع متغیر و معادلات انتقال - انتشار^۱ مبتنی بر قانون فیک^۲ برای انتقال گرما و املاح استفاده می‌کند. معادله جریان، جذب آب توسط ریشه گیاه و همچنین پسماند رطوبتی را به‌عنوان ویژگی هیدرولیکی خاک غیراشباع در نظر می‌گیرد. بسته‌های نرم‌افزاری با ماژول‌های بهینه‌سازی پارامتر غیرخطی از نوع لونیبرگ - مارکوارت^۳ ارائه می‌شوند تا امکان برآورد انواع پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح خاک را با استفاده از داده‌های تجربی فراهم کنند. پارامترهای هیدرولیکی ناشناخته را می‌توان با استفاده از رطوبت خاک اندازه‌گیری شده، بار فشاری و یا شار جریان‌های مرزی در طی جریان انتقالی، از طریق حل عددی معکوس معادله ریچاردز برآورد کرد. داده‌های اضافی مانند نگهداشت رطوبتی یا هدایت هیدرولیکی و همچنین تابع جریمه برای محدود کردن پارامترهای

بهینه‌سازی شده برای این که در یک محدوده محتمل و امکان‌پذیر (تخمین بی‌زی) قرار بگیرند را نیز می‌توان به صورت اختیاری در نظر گرفت.

پژوهشگران توانایی HYDRUS را در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک تحت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی ارزیابی کرده‌اند (محمدی و همکاران، ۱۴۰۱) (Simunek et al., 2008). فارس و همکاران از مدل HYDRUS-2D برای نشان دادن عملکرد سامانه آبیاری قطره‌ای در سه نوع بافت خاک مختلف استفاده کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل HYDRUS-2D حرکت آب را می‌توان به صورت عمودی و چند بعدی در خاک‌های شنی، لومی و رسی توصیف کرد. برای یک سامانه آبیاری قطره‌ای یکسان عرض خیس‌شدگی پياز رطوبتی در خاک رسی ۱/۵ برابر بیشتر از خاک شنی بود. این مطالعه نشان داد که عملکرد سامانه آبیاری قطره‌ای در خاک‌های لومی و رسی بهتر از خاک‌های شنی است (Fares et al., 2001). کوته و همکاران نیز از مدل HYDRUS-2D برای تجزیه و تحلیل الگوی خیس‌شدگی خاک و انتقال املاح غیر واکنش‌گر^۴ تحت قطره‌چکان زیرسطحی استفاده کردند، اما هیچ داده تجربی برای تأیید نتایج آن‌ها ارائه نشد. در این پژوهش فرض شد که غلظت اولیه املاح برابر با صفر است که این فرض معمولاً با شرایط واقعی در کود آبیاری سامانه قطره‌ای متفاوت است. Slack and Liga (2004) از مدل HYDRUS-2D برای تخمین الگوی خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده کردند، اما نتایج را با داده‌های تجربی واقعی مقایسه نکردند (Cote et al., 2003). اسکاگز و همکاران تجزیه و تحلیل گسترده‌ای از چندین آزمایش مزرعه‌ای تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی انجام داده و با موفقیت الگوهای خیس‌شدگی مشاهده شده را با پیش‌بینی‌های مدل HYDRUS-2D مقایسه کردند (Skaggs et al., 2004).

بن گال و همکاران پروفیل‌های رطوبتی خاک را با استفاده از مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی کردند و تطابق خوبی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده یافتند (Ben-Gal et

³ Levenberg-Marquardt

⁴ Non-reactive

¹ Advection-dispersion equation

² Fick's law

HYDRUS-2D توزیع نیتروژن در ناحیه توسعه ریشه گیاه پیاز را شبیه‌سازی کرد. رابرتز و همکاران از مدل HYDRUS-2D برای مطالعه الگوی توزیع نمک در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده کردند (Roberts et al., 2008).

کندلوس و سیمونک و گیل و همکاران نتایج مدل HYDRUS-2D را با داده‌های تجربی الگوی خیس‌شدگی خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مقایسه کردند (Kandelous and Simunek, 2010b; Gil et al., 2011). پاتل و راجپوت از مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی توزیع آب در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده کردند و به تطابق خوبی بین شبیه‌سازی‌ها و مشاهدات دست یافتند (Patel and Rajput, 2010). یائو و همکاران از نرم‌افزار SWMS-2D برای شبیه‌سازی عمق و عرض خیس‌شدگی خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده کردند. مقادیر شبیه‌سازی شده توزیع آب در خاک با مقادیر مشاهده شده تفاوتی نداشت. نتایج نشان داد پیش‌بینی‌های مدل نسبت به اثرات فشار برگشتی چندان حساس نیستند (Yao et al., 2011).

نتیجه‌گیری

اطلاع از ابعاد الگوی خیس‌شدگی خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای امکان تعیین نرخ دبی قطره‌چکان و فواصل بهینه آن‌ها را برای طراحان سامانه‌ها فراهم می‌کند. بدین ترتیب طراحان می‌توانند هزینه تجهیزات سامانه آبیاری را کاهش داده و شرایط رطوبتی بهتری در خاک برای استفاده بهینه و موثر از آب و کود فراهم کنند. برای محاسبه و تجسم الگوی خیس‌شدگی خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای جهت کمک به طراحی و مدیریت سامانه‌ها، نیاز به یک روش آسان با دقت قابل قبول می‌باشد. معادله ریچاردز برای توصیف نفوذ دو بعدی و سه بعدی و توزیع مجدد رطوبت در محیط‌های اشباع متغیر تحت آبیاری از یک منبع نقطه‌ای استفاده می‌شود. معادله ریچاردز را می‌توان با روش‌های تحلیلی، نیمه‌تحلیلی و عددی با استفاده از شرایط مرزی خاص حل کرد. پژوهشگران همچنین از معادله گرین-آمپت، روش‌های تجربی و شبکه‌های عصبی-مصنوعی برای مدل‌سازی رژیم‌های رطوبتی

(al., 2004). گاردناس و همکاران آبشویی نیترات را برای سناریوهای مختلف کوددهی تحت سامانه آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D بررسی کردند. تأثیر استراتژی کوددهی و نوع خاک بر پتانسیل آبشویی نیترات برای چهار سامانه مختلف آبیاری قطره‌ای (نوار تیپ سطحی، نوار تیپ زیرسطحی، قطره‌ای سطحی و میکروآپاش) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آبشویی فصلی نیترات در خاک‌های درشت بافت بیشترین میزان را دارد (Gardenas et al., 2005). لازاروویچ و همکاران یک شرط مرزی وابسته به سامانه آبیاری را که ویژگی‌های منبع آب، فشار ورودی و اثرات ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را بر دبی قطره‌چکان زیرسطحی محاسبه شده در مدل HYDRUS-2D در نظر می‌گیرد ترکیب کرده و کد حاصل را با داده‌های تجربی صحت‌سنجی کردند. آن‌ها همچنین مدل HYDRUS-2D را برای در نظر گرفتن اثرات فشار برگشتی بر کاهش دبی با استفاده از تابع مشخصه قطره‌چکان اصلاح کردند (Lazarovitch et al., 2005). اژدری از مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی توزیع آب و نیتروژن در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای استفاده کرد (Ajdary, 2005). کوک و همکاران نیز الگوهای خیس‌شدگی برآوردی توسط مدل‌های WetUp و HYDRUS-2D را برای سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی مقایسه کردند. این مطالعه صرفاً نظری بوده و شامل هیچ داده مشاهده‌ای نمی‌باشد. نتایج مشابهی برای خاک‌هایی با بافت ریز توسط هر دو مدل ارائه شد (Cook et al., 2006). پروونزانو دقت مدل HYDRUS-2D را با مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهدات تجربی پتانسیل ماتریک برای سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک لوم شنی با عمق نصب لترال‌های ۱۰ سانتی‌متر ارزیابی کرد و به نتایج رضایت‌بخشی دست یافت (Provenzano, 2007). ژو و همکاران مدل‌های APRI و HYDRUS-2D را برای شبیه‌سازی دینامیک آب خاک در یک تاکستان تحت آبیاری قطره‌ای ناقص ریشه مورد مقایسه قرار دادند (Zhou et al., 2007). اژدری از مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی الگوی توزیع آب در بافت‌های مختلف خاک استفاده کرد (Ajdary, 2008). Khalil (2008) با استفاده از مدل

خاک تحت آبیاری از یک منبع نقطه‌ای استفاده می‌کنند.

روش‌های حل عددی از قبیل روش‌های تفاضل محدود، اجزای محدود و اجزای مرزی معمولاً برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک استفاده می‌شوند. این روش‌ها با گسسته‌سازی دامنه خاک معادله جریان آب را به صورت عددی حل می‌کنند تا توزیع رطوبت در خاک را به دست آورند. روش تفاضل‌های محدود نسبتاً ساده و کارآمد است، اما ممکن است برای هندسه‌های پیچیده دقیق نباشد. روش اجزای محدود می‌تواند هندسه‌های پیچیده و مسائل غیرخطی را مدیریت کند، اما به منابع محاسباتی بیشتری نیاز دارد. روش اجزای مرزی برای مسائل مربوط به جریان‌های سطحی مناسب است، اما مستلزم آن است که شرایط مرزی جریان دقیقاً مشخص شود. روش‌های حل تحلیلی، از معادلات ریاضی برای توصیف توزیع رطوبت در خاک استفاده می‌کنند. این روش‌ها عموماً سریع‌تر از روش‌های عددی هستند، اما فقط در موارد خاص قابل اعمال می‌باشند و ممکن است تمام پیچیدگی‌های سیستم خاک را شامل نشوند. روش گرین-آپت یک روش تحلیلی ساده شده است که فرض می‌کند تا زمانی که خاک اشباع شود، نفوذ با سرعت ثابتی اتفاق می‌افتد. این روش برای تخمین میزان نفوذ برای انواع خاصی از خاک مفید است، اما ممکن است برای همه شرایط دقیق نباشد. روش‌های شبکه عصبی-مصنوعی تکنیک‌های یادگیری ماشین هستند و برای مدل‌سازی توزیع رطوبت در خاک به کار می‌روند. مدل‌های شبکه عصبی-مصنوعی می‌توانند روابط پیچیده بین متغیرهای ورودی و متغیرهای خروجی را از طریق مجموعه داده‌های موجود بیاموزند و پیش‌بینی‌هایی دقیق ارائه دهند. با این حال، برای توسعه مدل‌های شبکه عصبی-مصنوعی قابل اعتماد، به مقادیر زیادی داده‌های آموزشی با کیفیت بالا نیاز است. روش‌های تجربی مختلفی نیز برای برآورد الگوی توزیع رطوبت در خاک وجود دارد از جمله تحلیل ابعادی و روش‌های رگرسیونی. مدل‌های تجربی مورد استفاده باید برای شرایط خاص هر منطقه اعتبارسنجی شوند.

به طور کلی، انتخاب روش مدل‌سازی به هدف مسئله، داده‌ها و منابع محاسباتی موجود بستگی دارد. راین و همکاران شکاف‌های علمی موجود در زمینه دینامیک آب خاک تحت سامانه آبیاری

قطره‌ای را بیان کردند. پیشرفت‌های علمی بیشتر در مورد این موضوع نیازمند فعالیت‌های میدانی هدفمندتر برای تکمیل مدل‌سازی و تحلیل سناریوهای مختلف است. فعالیت‌های میدانی باید با هدف ارائه اندازه‌گیری‌های بهبود یافته‌ای از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و انتقال مواد مغذی و مواد شیمیایی کشاورزی که از طریق کود آبیاری اعمال می‌شوند، باشند. علاوه بر آن، مدل‌های توسعه یافته باید (الف) تغییرات در رطوبت اولیه و شرایط سامانه آبیاری، (ب) دقت در شبیه‌سازی جبهه رطوبتی و رطوبت خاک، (ج) اعتبار شرایط مرزی سطح خاک (د) الگوی رشد ریشه گیاه و تأثیر آن بر الگوی جذب آب برای پارامترهای ورودی مختلف، (ه) اثرات گرادیان‌های ثقلی، (ف) لایه‌بندی‌های خاک و (ز) تأثیر پدیده پسماند خاک را نیز در نظر بگیرند

منابع

- کریمی، ب.، سهرابی، ت.، میرزایی، ف.، و آبایی، ب. ۱۳۹۳. ارائه روابطی برای پیش‌بینی الگوی توزیع مجدد رطوبت خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به روش آنالیز ابعادی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۱(۶). ۲۲۳-۲۳۷.
- حاجی راد، ا.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانجج، ح.، و محمدی، س. ۱۴۰۰. برآورد ضریب گیاهی و ضریب تنش آبی ذرت علوفه‌ای تحت سطوح مختلف آبیاری به روش بیلان آب خاک (مطالعه موردی: دشت ورامین). تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲ (۹). ۲۳۷۱-۲۳۵۹.
- دهقانی سانجج، ح.، حاجی آقا بزرگی، ح. ر.، کنعانی، ا.، و دهقانی سانجج، غ. ۱۳۹۸. کاربرد مدل Hydrus-2D در بررسی تغییرات رطوبت خاک زیر درختان پسته با سیستم قطره‌ای زیر سطحی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۶). ۱۵۳۸-۱۵۴۹.
- محمدیگی، آ.، میرزایی، ف.، و اشرف، ن. ۱۳۹۵. بررسی و مقایسه توزیع مجدد رطوبت در آبیاری قطره‌ای با جریان پالسی و جریان پیوسته. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۷ (۳). ۴۶۷-۴۷۳.
- محمدی، س.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانجج، ح.، حاجی راد، ا.، و همایی، م. ۱۴۰۰. مدل‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای پالسی به روش آنالیز ابعادی و مقایسه

- Aryeni, T., and Ginting, V. 2022. A semi-analytical solution of Richards Equation for two-layered one-dimensional soil. *Advances in Water Resources*. 165: 104199.
- Baiamonte, G. 2020. Analytical solution of the Richards equation under gravity-driven infiltration and constant rainfall intensity. *Journal of Hydrologic Engineering*. 25(7): 04020031.
- Bajpai, A., and Kaushal, A. 2020. Soil moisture distribution under trickle irrigation: A review. *Water Supply*. 20(3): 761-772.
- Ben-Asher, J., Charach, C. H., and Zemel, A. 1986. Infiltration and water extraction from trickle irrigation source: The effective hemisphere model. *Soil Science Society of America Journal*. 50(4): 882-887.
- Ben-Gal, A., Lazarovitch, N., and Shani, U. 2004. Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. *Vadose Zone*. 3:1407-1413.
- Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. 1959. *Conduction of heat in solids*: Oxford University Press. New York, 510.
- Celia, M. A., Bouloutas, E. T., and Zarba, R. L. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water resources research*. 26(7): 1483-1496.
- Chali, A. K. N., Hashemi, S. R., and Akbarpour, A. 2023. Numerical solution of the Richards equation in unsaturated soil using the meshless Petrov-Galerkin method. *Applied Water Science*. 13(5): 119.
- Chen, J. M., Tan, Y. C., Chen, C. H., and Parlange, J. Y. 2001. Analytical solutions for linearized Richards Equation with arbitrary time-dependent surface fluxes. *Water Resources Research*. 37(4): 1091-1093.
- Chen, L., and Young, M. H. 2006. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces. *Water resources research*, 42(7).
- Chen, X., and Dai, Y. 2017. An approximate analytical solution of Richards equation with finite boundary. *Boundary Value Problems*. 2017: 1-11.
- Claudio, P., and Putti, M. 1994. A comparison of Picard and Newton iteration in the numerical solution of multidimensional variably saturated flow problems. *Water Resour Res*. 30(12): 3357-3374.
- Clausnitzer, V., Hopmans, J. W. 1994. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root
با مدل عددی HYDRUS-2D. تحقیقات آب و خاک ایران. ۱۹۰۳-۱۹۱۳. (۷)۵۲.
- محمدی، س.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانج، ح.، و همایی، م. ۱۳۹۹. تاثیر مدیریت پال سی در سیستم آبیاری قطره‌ای بر عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای. تحقیقات آب و خاک ایران. ۱۲)۵۱. ۳۱۳۵-۳۱۴۵.
- محمدی، س.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانج، ح.، حاجی راد، ا.، و همایی، م. ۱۴۰۱. شبیه‌سازی و برر سی توزیع رطوبت و جبهه رطوبتی در یک خاک ر سی تحت آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی. پژوهش آب ایران. ۲)۱۶. ۵۷-۶۹.
- محمدی، س.، میرلطیفی، س. م.، همایی، م.، دهقانی سانج، ح.، و حاجی راد، ا. ۱۴۰۰. تعیین ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای در سیستم آبیاری قطره‌ای پال سی به روش بیلان آب خاک در منطقه ورامین. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵)۵۲. ۱۲۲۳-۱۲۳۷.
- Aiswarya, L. and Sandeepika, M. 2024. Soil moisture distribution pattern under drip irrigation in sandy loam soil using gravimetric method. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(2): 198-204.
- Ajdary, K. 2005. Modeling of water and nitrogen movement under drip fertigation (Doctoral dissertation, Indian Agricultural Research Institute; New Delhi).
- Ajdary, K. 2008. Application of Hydrus-2D for simulation of water distribution in different types of soils. In *International meeting on soil fertility land management and agroclimatology*. Turkey, pp. 253-261.
- Al-Ogaidi, A. A., Wayayok, A., Rowshon, M. K., and Abdullah, A. F. 2016. Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Agricultural Water Management*, 176: 203-213.
- Amin, M. S., and Ekhmaj, A. I. 2006. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In *7th International micro irrigation congress (Vol. 1016)*.
- Arampatzis, G., Tzimopoulos, C., Sakellariou-Makrantonaki, M., and Yannopoulos, S. 2001. Estimation of unsaturated flow in layered soils with the finite control volume method. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*. 50(4): 349-358.

- Elmaloglou, S. T., and Malamos, N. 2003. A method to estimate soil-water movement under a trickle surface line source, with water extraction by roots. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*. 52(3): 273-284.
- Elmaloglou, S. T., and Malamos, N. 2007. Estimation of width and depth of the wetted soil volume under a surface emitter, considering root water-uptake and evaporation. *Water resources management*. 21: 1325-1340.
- Elmaloglou, S., and Diamantopoulos, E. 2008. The effect of intermittent water application by surface point sources on the soil moisture dynamics and on deep percolation under the root zone. *Computers and electronics in agriculture*. 62(2): 266-275.
- Elmaloglou, S., and Diamantopoulos, E. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agricultural Water Management*. 96(11): 1587-1595.
- Elmaloglou, S., and Malamos, N. 2005. Estimation of the wetted soil volume depth, under a surface trickle line source, considering evaporation and water extraction by roots. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*. 54(4): 417-430.
- Eltarabily, M. G., Mohamed, A. Z., Begna, S., Wang, D., Putnam, D. H., Scudiero, E., and Bali, K. M. 2024. Simulated soil water distribution patterns and water use of Alfalfa under different subsurface drip irrigation depths. *Agricultural Water Management*. 293: 108693.
- Fares, A., Parsons, L. R., Wheaton, T. A., Morgan, K. T., Simunek, J., and Van Genuchten, M. T. 2001, December. Simulated drip irrigation with different soil types. In *Proc. Florida State Horticultural Society*. 114: 22-24.
- Farthing, M. W., and Ogden, F. L. 2017. Numerical solution of Richards' equation: A review of advances and challenges. *Soil Science Society of America Journal*. 81(6): 1257-1269.
- French, M. N., Krajewski, W. F., Cuykendall, R. R. 1992. Rainfall forecasting in space and time using a neural network. *Journal of hydrology*. 137(1-4): 1-31.
- Gardenas, A. I., Hopmans, J. W., Hanson, B. R., and Šimunek, J. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios growth and soil water flow. *Plant and soil*. 164: 299-314.
- Coelho, E. F., and Or, D. 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant and Soil*. 206: 123-136.
- Cook, F.J., Thorburn, P.J., Fitch, P., Charlesworth, P. B., and Bristow, K.L. 2006. Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environmental Modelling Software*. 21:1353-1359.
- Cooper, D. M. 1990. Modelling soil moisture movement following drip irrigation of sugarcane. *International Association of Hydrological Sciences*. 195: 385-396.
- Cote, C. M., Bristow, 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(3-4): 143-156.
- David, M., and José, A. 2010. Marengo temporal downscaling: a comparison between artificial neural network and autocorrelation techniques over the Amazon Basin in present and future climate change scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*. 100:413-421.
- De Vos, N. J., and Rientjes, T. H.M. 2005. Constraints of artificial neural networks for rainfall-runoff modelling: trade-offs in hydrological state representation and model evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*. 9(1/2): 111-126.
- Ehlers, W., Hamblin, A. P., Tennant, D., Van der Ploeg, R. R. 1991. Root system parameters determining water uptake of field crops. *Irrigation Science*. 12: 115-124.
- Eisenhauer, D. E., Martin, D. L., Heeren, D. M., Hoffman, G. J. 2021. Irrigation systems management. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*.
- Ekhmaj, A. I., Abdulaziz, A. M., and Almdny, A. M. 2007. Artificial neural networks approach to estimate wetting pattern under point source trickle irrigation. In *8th African Crop Science Society Conference, El-Minia, Egypt, 27-31 October 2007 (pp. 1625-1630)*. African Crop Science Society.
- Amin, MSM., and Ekhmaj, AIM. 2006. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In: *Proceedings of 7th international micro irrigation congress, PWTC, Kuala Lumpur, Malaysia, 10-16 Sept 2006*.

- irrigation using neural networks. *Irrigation science*. 28: 535-544.
- Hongli, J., William, R.C. 2004. Soil moisture estimation using an artificial neural network: a feasibility study. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 30(5):827-839.
- Hopmans, J. W., and Bristow, K.L. 2002. Current capabilities and future needs of root water and nutrient uptake modeling. *Advances in agronomy*. 77: 103-183.
- Ismail, S. M., El-abedin, T. Z., Wassif, A., and El-Nesr, M. N. 2006 Wetting pattern simulation of surface and subsurface drip irrigation systems. I-Model development. *Misr J. Ag. Eng.* 23(3): 722-746.
- Ismail, S., Zien-El-Abedin, T., Omara, A. A., Abdel-Tawab, E. 2014. Modeling the soil wetting pattern under pulse and continuous drip irrigation. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*. 14(9): 913-922.
- Jarvis, N. J. 1989. A simple empirical model of root water uptake. *Journal of Hydrology*. 107(1-4): 57-72.
- Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. 2010a. 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.
- Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. 2010b. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*. 28: 435-444.
- Kandelous, M. M., Liaghat, A., and Abbasi, F. 2008. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. *J Agri Sci*. 39(2):371-378.
- Kavetski, D., Binning, P., Sloan S W. 2001. Adaptive time stepping and error control in a mass conservative numerical solution of the mixed form of Richards equation. *Advances in water resources*, 24(6), 595-605.
- Khalil. A. 2008. Simulation of nitrogen distribution in soil with drip irrigation system. *J Appl Sci*. 8(18): 3157-3165.
- Kumar, M., Raghuvanshi, N. S., and Singh, R. 2011 Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review. *Irrigation science*. 29: 11-25.
- Kutilek, M., Nielsen, D. R. 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag Publishers, Germany.
- under micro-irrigation. *Agricultural water management*. 74(3): 219-242.
- Gardner, WR. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science*. 89:63-73.
- Gardner, WR. 1964 Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agronomy Journal*. 56:41-45.
- Gardner, WR., Ehlig, C.F. 1962. Some observations on water movement to plant roots. *Agronomy Journal*. 54:453-456.
- Gąsiorowski, D., and Kolarski, T. 2020. Numerical solution of the two-dimensional Richards equation using alternate splitting methods for dimensional decomposition. *Water*. 12(6): 1780.
- Gil, M., Rodríguez-Sinobas, L., Sánchez, R., Juana. 2011. Procedures for determining maximum emitter discharge in subsurface drip irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 137(5): 287-294.
- Gowdich, L. C, Muñoz-Carpena R DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF AN EMITTER SUPPLY RADIUS EQUATION FOR 3-DIMENSIONAL GREEN-AMPT INFILTRATION.
- Green, W.H. and Ampt, G.A., 1911. Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*. 4(1): pp.1-24.
- Hajirad, I., Mirlatifi, S. M., Dehghanisani, H., and Mohammadi, S. 2021. Determining yield response factor (ky) of silage maize under different irrigation levels of pulsed and continuous irrigation management. *Central Asian Journal of Plant Science Innovation*. 1(4): 214-220.
- Hanks, R. J. 2012. *Applied soil physics: soil water and temperature applications* (Vol. 8). Springer Science and Business Media.
- Hinnell, A. C., Lazarovitch, N., Furman, A., Poulton, M., and Warrick, A. W. 2010. Neuro-Drip: estimation of subsurface wetting patterns for drip irrigation using an adaptive time stepping method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 136(6): 697-705.
- Kavetski, D., Binning, P., Sloan, S. W. 2002. Adaptive backward Euler time stepping with truncation error control for numerical modelling of unsaturated fluid flow. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 53(6), 1301-1322.

- Malek, K., and Peters, R. T. 2011. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 137(8): 530-536.
- Mansell, R. S., Ma, L., Ahuja, L. R., and Bloom, S. A. 2002. Adaptive grid refinement in numerical models for water flow and chemical transport in soil: A review. *Vadose Zone Journal*. 1(2): 222-238.
- Matthews, C. J., Braddock, R. D., and Sander, G. C. 2004. Modeling flow through a one-dimensional multi-layered soil profile using the Method of Lines. *Environmental Modeling and Assessment*. 9: 103-113.
- Matthews, C. J., Cook, F. J., Knight, J. H., and Braddock, R. D. 2005. Handling the water content discontinuity at the interface between layered soils within a numerical scheme. *Soil Research*. 43(8): 945-955.
- Michelakis, N., Vougioucalou, E., and Clapaki, G. 1993. Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 24(2): 119-131.
- Minasny, B., Hopmans, J. W., Harter, T., Eching, S. O., Tuli, A., and Denton, M. A. 2004. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data. *Soil Science Society of America Journal*. 68(2): 417-429.
- Minasny, B., McBratney, A. B. 2002. The neuro-m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*. 66(2): 352-361.
- Miller, C. T., Williams, G. A., Kelley, C. T., and Tocci, M. D. 1998. Robust solution of Richards' equation for non uniform porous media. *Water Resour Research*. 34(10):2599-2610.
- Mmolawa, K., and Or, D. 2000a. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant and soil*. 222(1-2): 163-190.
- Mmolawa, K., and Or, D. 2000b. Water and solute dynamics under a drip-irrigated crop: experiments and analytical model. *Transactions of the ASAE*. 43(6): 1597-1608.
- Mmolawa, K., and Or, D. 2003. Experimental and numerical evaluation of analytical volume balance model for soil water dynamics under drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*. 67(6): 1657-1671.
- Mohammadi, S., Mirlatifi, S. M., Homae, M., Dehghanisanij, H., and Hajirad, I. 2023. Lafolie, F., Bruckler, L., and Tardieu, F. 1991. Modeling root water potential and soil-root water transport: I. Model presentation. *Soil Science Society of America Journal*. 55(5): 1203-1212.
- Lafolie, F., Guennelon, R., and Van Genuchten, M. T. 1989a. Analysis of water flow under trickle irrigation: I. Theory and numerical solution. *Soil Science Society of America Journal*. 53(5): 1310-1318.
- Lafolie, F., Guennelon, R., and Van Genuchten, M. T. 1989b. Analysis of water flow under trickle irrigation: II. Experimental evaluation. *Soil Science Society of America Journal*. 53(5): 1318-1323.
- Lazarovitch, N., Poulton, M., Furman, A., and Warrick, A. W. 2009. Water distribution under trickle irrigation predicted using artificial neural networks. *Journal of Engineering Mathematics*. 64:207-218.
- Lehmann, F., Ackerer, P. H. 1998. Comparison of iterative methods for improved solutions of the fluid flow equation in partially saturated porous media. *Transport in porous media*, 31, 275-292.
- Leij, F. J., Priesack, E., Schaap, M. G. 2000. Solute transport modeled with Green's functions with application to persistent solute sources. *Journal of Contaminant Hydrology*. 41(1-2): 155-173.
- Li, J., Yoder, R. E., Odhiambo, L. O., and Zhang, J. 2004. Simulation of nitrate distribution under drip irrigation using artificial neural networks. *Irrigation science*. 23: 29-37.
- Li, J., Zhang, J., and Ren, L. 2003. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. *Irrigation Science*. 22: 19-30.
- Liga, M., Slack, D. 2004. A design model for subsurface drip irrigation in Arizona. *Dep Agri Biosys, Arizona*. Available online (<http://wsp.arizona.edu/sites/wsp.arizona.edu/files/uawater/documents/Fellowship200304/liga.pdf>). Checked on Dec, 10, 2009.
- Liu, X. F., Wan, S. Q., Feng, L., Jiang, S. F., Kang, Y. H., and Liu, S. P. 2015. Response of potato yield and irrigation water use efficiency under subsurface drip irrigation at various lateral depths. *Journal of Irrigation and Drainage*. 34: 63-66.
- Lubana, P. P. S., and Narda, N. K. 2001. Modelling soil water dynamics under trickle emitters-a review. *Journal of Agriculture Engineering Research*. 78(3): 217-232.

- Ravi, V., and Williams, J. R. 1998. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models. United States Environmental Protection Agency (EPA), Tech. Rep. EPA/600/R-97/128a.
- Roberts, T., Lazarovitch, N., Warrick, A. W., and Thompson, T. L. 2009. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D. *Soil Science Society of America Journal*. 73(1): 233-240.
- Roth, R. L. 1974. Soil moisture distribution and wetting pattern from a point source. Proc. Second Inter'l. Drip Irrig. Cong., San Diego, CA, 1974.
- Sanayei, H. R. Z., Rakhshandehroo, G. R., and Talebbeydokhti, N. 2017. Innovative analytical solutions to 1, 2 and 3D water infiltration into unsaturated soils for initial-boundary value problems. *Scientia Iranica*. 24(5): 2346-2368.
- Schmitz, G. H., Schütze, N., Petersohn, U. 2002. New strategy for optimizing water application under trickle irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 128(5): 287-297.
- Schwartzman, M., and Zur, B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 112(3): 242-253.
- Sepaskhah, A. R., and Chitsaz, H. 2004. Validating the Green-Ampt analysis of wetted radius and depth in trickle irrigation. *Biosystems engineering*. 89(2): 231-236.
- Simunek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M. Th. 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, International Ground Water Model. Cent., Colo. Sch. of Mines, Golden, CO.
- Simunek, J. 2005. Models of water flow and solute transport in the unsaturated zone. In: MG Handerson (ed) *Encyclopedia of Hydrology Science*. 1171-1180.
- Simunek, J., van Genuchten, M. T., and Sejna, M. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose zone journal*. 7(2): 587-600.
- Kandelous, M. M., and Simunek, J. 2010b. 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.
- Singh, D. K., Rajput, T. B. S., Sikarwar, H. S., Sahoo, R. N., and Ahmad, T. 2006. Simulation of soil Evaluation of silage maize production under pulsed drip irrigation in a semi-arid region. *Irrigation Science*. 1-15.
- Molz, F. J. 1981. Models of water transport in the soil-plant system: A review. *Water resources research*. 17(5): 1245-1260.
- Moncef, H., Hedi, D., Jelloul, B., Mohamed, M. 2002. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. *Irrigation and Drainage: The Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*. 51(4): 347-360.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*. 12(3): 513-522.
- Musters, P. A. D., Bouten, W. 1999. Assessing rooting depths of an Austrian pine stand by inverse modeling soil water content maps. *Water Resources Research*. 35(10): 3041-3048.
- Neuman, S. P., Feddes, R. A., and Bresler, E. 1975. Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: I. Theory. *Soil Science Society of America Journal*. 39(2): 224-230.
- Ogden, F. L., and Saghafian, B. 1997. Green and Ampt infiltration with redistribution. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 123(5): 386-393.
- Pages, L., Jordan, M. O., and Picard, D. 1989. A simulation model of the three-dimensional architecture of the maize root system. *Plant and Soil*. 119: 147-154.
- Palomo, M. J., Moreno, F., Fernández, J. E., Díaz-Espejo, A., and Girón, I. F. 2002. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agricultural water management*. 55(1): 15-35.
- Patel, N., Rajput, T. B. S. 2010. Use of simulation modeling for enhancing potato production using subsurface drip. *Potato Journal*. 37(1-2): 21-27.
- Philip, J. R. 1984. Steady infiltration from circular cylindrical cavities [Soil water]. *Journal of the Soil Science Society of America (USA)*.
- Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *J Irrig Drain Engg ASCE*. 133(4):342-349.
- Pullan A J, Collins I F (1987) Two-and three-dimensional steady quasi-linear infiltration from buried and surface cavities using boundary element techniques. *Water Resources Research*. 23(8): 1633-1644.

- uptake model. *Soil Science Society of America Journal*. 65(4): 1027-1037.
- Vrugt, J. A., van Wijk, M. T., Hopmans, J. W., Šimunek, J. 2001a. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling. *Water resources research*. 37(10): 2457-2470.
- Wang, H. F., and Anderson, M. P. 1995. Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods. Academic Press.
- Warrick, A. W., Lomen, D. O., and Amoozegar-Fard, A. 1980. Linearized moisture flow with root extraction for three dimensional, steady conditions. *Soil Science Society of America Journal*. 44(5): 911-914.
- Wu, Y. S., and Pan, L. 2005. An analytical solution for transient radial flow through unsaturated fractured porous media. *Water resources research*. 41(2).
- Yadav, B. K., Mathur, S., Siebel, M. A. 2009. Soil moisture flow modeling with water uptake by plants (wheat) under varying soil and moisture conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 135(3): 375-381.
- Yang, P., Wu, L., Cheng, M., Fan, J., Li, S., Wang, H., Qian, L. 2023. Review on drip irrigation: impact on crop yield, quality, and water productivity in China. *Water*. 15(9): 1733.
- Yao, W. W., Ma, X. Y., Li, J., Parkes, M. 2011. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*. 29: 331-339.
- Yoon, H., Hyun, Y., Lee, K. K. 2007. Forecasting solute breakthrough curves through the unsaturated zone using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*. 335(1-2): 68-77.
- Zhou, Q., Kang, S., Zhang, L., and Li, F. 2007. Comparison of APRI and Hydrus-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation. *Plant and Soil*. 291: 211-223.
- wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural water management*. 83(1-2): 130-134.
- Skaggs, R.W., Khaleel, R. 1982. Infiltration. In: Haan CT, Johnson HP, Brakensiek DL (eds) *Hydrologic modelling of small watersheds*, ASAE Monograph No 5, St Joseph, Michigan, pp 121-166.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J., Shouse, P.J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J Irrig Drain Engg ASCE*. 130(4):304-310.
- Somaratne, S., Seneviratne, G., Coomaraswamy, U. 2005. Prediction of soil organic carbon across different land-use patterns: A neural network approach. *Soil Science Society of America Journal*. 69(5): 1580-1589.
- Song, Z., and Jiang, Z. 2023. A Data-facilitated Numerical Method for Richards Equation to Model Water Flow Dynamics in Soil. arXiv preprint arXiv:2310.02806.
- Thorburn, P. J., Cook, F. J., and Bristow, K. L. 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science*. 22(3): 121-127.
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*. 44(5): 892-898.
- Vanderborght, J., Kasteel, R., Herbst, M., Javaux, M., Thiéry, D., Vanclooster, M., and Vereecken, H. 2005. A set of analytical benchmarks to test numerical models of flow and transport in soils. *Vadose Zone Journal*. 4(1): 206-221.
- Varney, G. T., and Canny, M. J. 1993. Rates of water uptake into the mature root system of maize plants. *New Phytologist*. 123(4): 775-786.
- Vogel, T., van Genuchten, MTh., and Cislérova, M. 2001. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advanced Water Resource*. 24:133-144.
- Vrugt, J. A., Hopmans, J. W., Šimunek, J. 2001b. Calibration of a two-dimensional root water

A Review of Modeling Approaches for Soil Moisture Distribution under Drip Irrigation Systems

S. Mohammadi^{1*} and I. Hajirad²

Abstract

The design of drip irrigation systems involves selecting an appropriate combination of dripper flow rate and spacing between drippers for a specific set of soil, crop and climatic conditions. The design should ensure that the wetting pattern and moisture distribution around the irrigation dripper aligns with the root growth pattern. The multidimensional nature of water flow in soil, root water uptake, and short irrigation cycles adds complexity to modeling soil moisture dynamics under drip irrigation systems. Most researchers use analytical, semi-analytical, and numerical solutions of the Richards equation with defined boundary conditions to model water infiltration from a point irrigation source, as these methods offer advantages over direct measurements for the design, implementation, and management of drip irrigation systems. Additionally, some researchers have developed models based on the Green-Ampt equation or have used empirical models (based on regression methods and dimensional analysis) and artificial neural networks to describe infiltration from point or line irrigation sources. This review study examines the distribution of soil moisture under drip irrigation systems, and presents various modeling approaches, along with their advantages and limitations.

Keywords: Dripper, Dimensional Analysis, Moisture Distribution, Richards Equation, Wetting Pattern

¹ - Ph. D, Water Management and Engineering Department, Collage of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
(* Corresponding Author Email: Sanaz.mohammadi@modares.ac.ir)

² - Ph.D, Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 12 Sep 2024

Accepted: 30 Oct 2024