

شبیه‌سازی تجربی ابعاد پیاز رطوبتی بافت‌های مختلف خاک

ندا خان‌محمدی و سینا بشارت^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱/۲۱)

چکیده

طراحی درست سیستم آبیاری قطره‌ای نیازمند آگاهی کافی از نحوه توزیع جریان آب در خاک به صورت افقی و عمودی و مدل کردن ابعاد پیاز رطوبتی تشکیل یافته تحت منبع نقطه‌ای می‌باشد. کارهای آزمایشگاهی و صحرایی با توجه به محدودیت زمانی و مالی در این راستا مناسب نبوده و کاربرد نرم‌افزارهای دقیق جهت تعیین معادلات مختلف در شرایط متفاوت ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این تحقیق، ارائه مدلهایی ساده جهت برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در دبی‌ها و بافت‌های مختلف در سیستم آبیاری قطره‌ای است. بدین منظور مدل HYDRUS-2D برای چهار دبی مختلف در یک بافت خاک و نیز کلاس‌های مختلف بافت خاک برای یک دبی کاربردی اجرا شد. مقادیر حاصل از اجرای نرم‌افزار که شامل عمق و حداکثر قطر جبهه رطوبتی بود نسبت به زمان برازش یافت. نتایج شاخص‌های آماری برای تمامی معادلات حاصله ($R > 0.96$, $RMSE < 2/12$ و $MAD < 1/38$) حاکی از دقت مناسب معادلات مربوطه جهت تعیین ابعاد پیاز رطوبتی تحت منبع نقطه‌ای است. همچنین نتایج حاصله نشان داد که حداکثر و حداقل عمق و قطر جبهه رطوبتی، به ترتیب، مربوط به بافت‌های شنی لومی و سیلت می‌باشد.

کلمات کلیدی: آبیاری قطره‌ای، ابعاد پیاز رطوبتی، مدل HYDRUS-2D

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

*مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: s.besharat@urmia.ac.ir

مقدمه

در میان روش‌های آبیاری تحت فشار روش آبیاری قطره‌ای به دلیل راندمان بالا، تلفات تبخیر کم، خصوصیات فنی و شرایط بهینه‌ای که در محیط ریشه به لحاظ رطوبت، تهویه و تغذیه ایجاد می‌کند دارای اهمیت خاصی است (۷). بنابراین، آبیاری قطره‌ای روشی مطلوب جهت صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی قلمداد می‌گردد و استخراج روابط تعیین ابعاد پیاز رطوبتی شکل گرفته در زیر این سیستم دارای ارزش و اهمیت مضاعف می‌باشد. به دلیل اهمیت موضوع، تحقیقات بسیاری در رابطه با جبهه رطوبتی زیر یک قطره‌چکان صورت گرفته (۱، ۹، ۱۸، ۲۱، ۲۷) و مدل‌های عددی، ریاضی و تجربی مختلفی جهت شبیه‌سازی الگوی خیس‌شدگی خاک و ابعاد جبهه رطوبتی برای سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی ارائه شده است (۲، ۵، ۶، ۱۰، ۱۳، ۲۲).

با توجه به مطالعات ارزشمند صورت گرفته، برای آگاهی از نحوه توزیع رطوبت در ناحیه ریشه، آزمایش‌های صحرایی وقت‌گیر و پرهزینه‌ای لازم است که دامنه اعتبارشان از نظر شرایط فیزیکی و منطقه‌ای دارای محدودیت‌هایی است. در حالیکه مدل‌های عددی با شبیه‌سازی شرایط واقعی حرکت آب در محیط متخلخل، قادر به ارزیابی وضعیت رطوبت خاک در یک سیستم آبیاری هستند (۴). در سال‌های اخیر، مدل‌های شبیه‌ساز معتبری برای پاسخ‌گویی به مسائل مربوط به حرکت آب در خاک ارائه شده است. نرم‌افزار HYDRUS-2D از جمله این مدل‌هاست که توسط محققین بسیاری برای شبیه‌سازی حرکت آب، به‌کار رفته است. افرادی همانند آسولین (۱۱)، کوته و همکاران (۱۵)، مولوا و آر (۱۹)، اسکاگز و همکاران (۲۶)، گاردنس و همکاران (۱۶)، کوک و همکاران (۱۴)، سیال و اسکاگز (۲۵) و خان محمدی و همکاران (۳) از مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی رطوبت خاک بهره‌جسته‌اند. به‌عنوان نمونه، اسکاگز و همکاران (۲۶)، نشان دادند که شبیه‌سازی HYDRUS-2D برای آبیاری قطره‌ای با جزئیات اندازه‌گیری‌های صحرایی تطابق خوبی دارد. همچنین نتایج

خان‌محمدی و همکاران (۳) نشان داد که HYDRUS-2D توانایی بالایی در پیش‌بینی توزیع مقدار آب خاک دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید در تحقیق و طراحی کارهای مدیریتی آبیاری قطره‌ای مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به مشکلات موجود برای انجام کارهای مزرعه‌ای و آزمایشگاهی جهت تعیین شکل پیاز رطوبتی، کاربرد نرم‌افزارهایی همانند HYDRUS-2D، می‌تواند روشی مناسب جهت مدل‌نمودن ابعاد جبهه رطوبتی شکل گرفته زیر قطره چکان باشد. بدین‌منظور در این مطالعه، نرم‌افزار HYDRUS-2D جهت تعیین معادلات تجربی برآورد ابعاد پیاز رطوبتی تحت آبیاری قطره‌ای با دبی‌های مختلف در خاک‌هایی با بافت متفاوت مورد استفاده قرار گرفت تا با در نظر گرفتن شرایط مختلف، روابطی کاربردی برای این نوع سیستم آبیاری حاصل شود.

مواد و روش‌ها

شبیه‌سازی عددی یک شیوه کارآمد برای تحقیق و بررسی کاربردهای مدیریتی آبیاری قطره‌ای است (۲۶). اهمیت کاربرد روش‌های عددی با توجه به هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن کارهای مزرعه‌ای و آزمایشگاهی بیش از پیش آشکار می‌شود. بنابراین به کارگیری روش‌های عددی در مطالعات اخیر از جمله مطالعه حاضر، به‌جای مطالعات مزرعه‌ای و آزمایشگاهی با توجه به محدودیت آنها، امری منطقی بوده و سرآغاز نگاهی نو به مسائل آب و خاک است. مدل‌های بسیاری برای انجام این‌گونه شبیه‌سازی‌ها به وجود آمده است، اما حصول نتایج صحیح مستلزم انتخاب مدلی مناسب که بارها توسط محققان مختلف به عنوان ابزاری مفید معرفی شده است، می‌باشد. یکی از این مدل‌های عددی نرم‌افزار HYDRUS است که افراد مختلفی بعد از کار با آن به قابلیت آن اذعان داشته‌اند (۳، ۱۲، ۱۷، ۲۰، ۲۵، ۲۶). بعد از انتخاب مدل مناسب و اطمینان از قابلیت آن با توجه به مطالعات پیشین، ابتدا بهتر است مختصری در رابطه با نحوه شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار توضیح داده شود و

برای هر ۱۲ کلاس بافت خاک تعبیه شده در آن برای دبی ثابت ۲/۳۸ سانتی‌متر بر ساعت اجرا شد. اعمال شرایط یکسان جهت حصول معادلات مربوطه، امکان مقایسه صحیح معادلات در شرایط کاربردی را فراهم خواهد آورد.

ارزیابی کارایی مدل

جهت بیان کمی تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر تخمینی از مدل و به عبارت دیگر جهت ارزیابی کارایی مدل، از شاخص‌های خطا هم‌چون جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (۸) و میانگین خطای مطلق (MAE) (۲۸) و همچنین شاخص همبستگی (R) (۲۳) که به صورت زیر بیان می‌شوند، استفاده گشته است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \hat{X})^2}{n}} \quad [5]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X - \hat{X}| \quad [6]$$

$$R = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (\hat{X} - \bar{\hat{X}})(X - \bar{X}) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{X} - \bar{\hat{X}})^2 \times \sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}} \quad [7]$$

که در آنها، n اندازه نمونه، \hat{X} مقادیر تخمینی از فرمول‌های مربوطه، $\bar{\hat{X}}$ میانگین مقادیر تخمینی از فرمول‌های مربوطه، X مقادیر مشاهداتی و \bar{X} میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشند. شرایط مرزی در مدل به صورت شکل (۱) تعریف گردید. بر این اساس شرط مرز بالا به صورت شرایط اتمسفریک و در یک نقطه به صورت شدت جریان ثابت نقطه‌ای در نظر گرفته شد. شرایط مرزی چپ و راست بدون جریان و در زیر منطقه شبیه‌سازی به صورت زهکش آزاد مدنظر قرار گرفت.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج Li و همکاران (۱۸)، الگوهای رطوبتی تحت یک منبع نقطه‌ای از طریق شعاع رطوبتی (r) و عمق

سپس روش کار بیان گردد.

شبیه‌سازی عددی: مدل HYDRUS-۲D (۲۴) یک مدل عناصر محدود است که معادله ریچاردز را برای جریان آب به صورت اشباع در محیط متخلخل حل می‌کند. معادله ریچاردز یکی از مهم‌ترین معادلات موجود در حرکت آب در خاک است. معادله دو بعدی ریچاردز با فرض اینکه خاک همگن و همروند است عبارت است از:

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

که در آن، θ مقدار حجمی آب، h بار فشاری آب خاک، t زمان، x مختصات افقی، z مختصات عمودی و K هدایت هیدرولیکی می‌باشد. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک توسط رابطه ون‌گنختان - موعلم مدل شده‌اند:

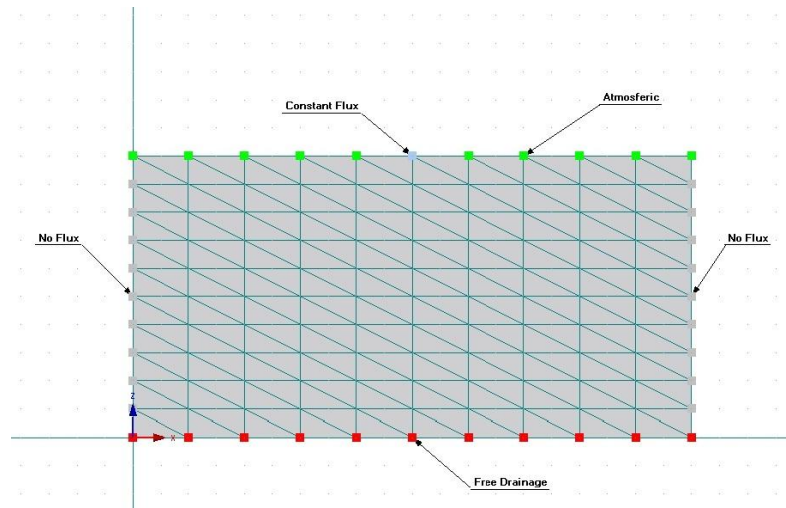
$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad [2]$$

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

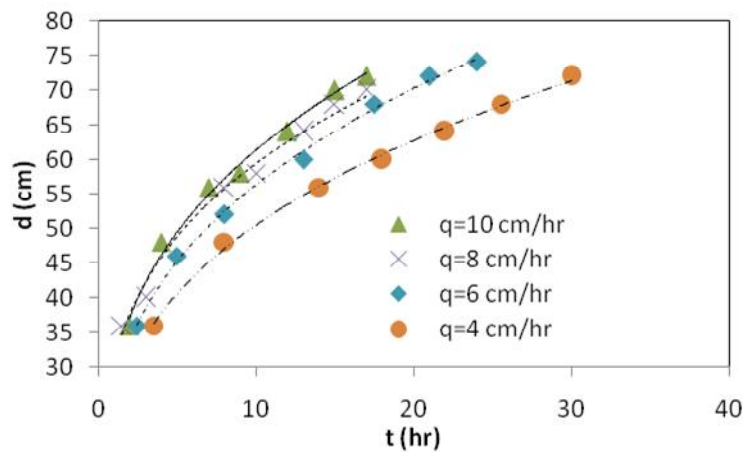
$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - 1/n \quad [4]$$

که در روابط اخیر، θ_s مقدار رطوبت اشباع، θ_r مقدار رطوبت باقی مانده، k_s هدایت هیدرولیکی اشباع و α و n پارامترهای شکل می‌باشند. مدل HYDRUS-۲D از روش عناصر محدود (Galerkin-type) برای حل معادلات ۱ تا ۴ استفاده می‌کند.

در این مطالعه، جهت مدل‌سازی ابعاد جبهه رطوبتی خاک تحت یک منبع نقطه‌ای، نرم‌افزار HYDRUS-۲D (۲۴) مورد استفاده قرار گرفت. در این شبیه‌سازی فقط قسمت راست پیاز رطوبتی در نظر گرفته شد. مش‌بندی مرزها در روش عناصر محدود مستطیلی و فقط در لبه‌های جبهه رطوبتی خاک به صورت مثلثی در نظر گرفته شد. لوله قطره‌چکان در مرز به صورت یک نیم دایره در قسمت مرزی بالا وارد نرم‌افزار گردید. بعد از آماده‌شدن نرم‌افزار برای اجرا، مدل چندین بار برای دبی‌ها و بافت‌های مختلف اجرا گردید. ابتدا اجرای نرم‌افزار برای چهار دبی مختلف ۴، ۶، ۸ و ۱۰ سانتی‌متر بر ساعت بدون تغییر بافت خاک صورت گرفت. سپس نرم‌افزار



شکل ۱. شرایط مرزی محیط شبیه‌سازی به صورت دوبعدی



شکل ۲. تغییرات حداکثر قطر پیاز رطوبتی نسبت به زمان برای دبی‌های مختلف

الف) معادله تعیین حداکثر قطر پیاز رطوبتی در دبی‌های مختلف

برای تعیین معادله حداکثر قطر جبهه رطوبتی زیر منبع نقطه‌ای (قطره‌چکان)، مقادیر حداکثر قطر جبهه رطوبتی که توسط نرم‌افزار حاصل گشت، به‌عنوان تابعی از زمان آبیاری برای دبی‌های مختلف ترسیم شد (شکل ۲).

در شکل (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار دبی، در زمان ثابت، مقدار حداکثر قطر بیشتری را در پیاز رطوبتی تشکیل یافته در زیر قطره‌چکان شاهد خواهیم بود. همچنین شکل حاصله افزایش صعودی میزان حداکثر قطر جبهه رطوبتی

خیس‌شدگی (z) مشخص می‌شوند بنابراین، بررسی حداکثر قطر جبهه رطوبتی و عمق آن برای توصیف ابعاد پیاز رطوبتی زیر یک قطره‌چکان امری منطقی است. در این پژوهش پیشروی عمق جبهه رطوبتی زیر منبع نقطه‌ای با z و حداکثر قطر جبهه رطوبتی زیر این منبع با d نشان داده شده است. ابتدا نحوه پیشروی عمق جبهه رطوبتی و حداکثر قطر این جبهه نسبت به زمان برای دبی‌های مختلف برای یک نوع بافت خاک مورد بررسی قرار گرفت. سپس معادلات مربوط به ۱۲ کلاس مختلف بافت خاک حاصل گشت. در بخش‌های «الف» تا «ج» به بررسی این معادلات پرداخته می‌شود.

جدول ۱. ضرایب معادله تعیین حداکثر قطر پیاز رطوبتی برای دبی‌های مختلف به‌همراه شاخص‌های آماری مربوطه

MAD	RMSE	R	b	a	دبی (cm/hr)
۱/۰۰۴	۱/۱۴۴	۰/۹۹۵	۰/۳۱۲	۲۹/۸۳	۱۰
۱/۰۳۷	۱/۲۶۷	۰/۹۹۵	۰/۲۸۵	۳۰/۸۰	۸
۰/۸۰۱	۰/۷۲۰	۰/۹۹۹	۰/۳۱۸	۲۷/۰۴	۶
۰/۷۲۶	۰/۶۲۲	۰/۹۹۹	۰/۳۱۴	۲۴/۴۴	۴

نسبت به زمان را نشان می‌دهد. این نتایج مشابه نتایج نصیری و همکاران (۶) می‌باشد. ایشان به این نتیجه رسیدند که اندازه تغییرات پیشروی افقی زیر قطره‌چکان با افزایش دیرپایی زمان آبیاری صعودی می‌باشد که این روند به‌ازای سه مقدار دبی کاربردی در مطالعه آنها مشهود بود. همچنین ایشان بیان داشتند که مقدار دبی بالاتر، پیشروی افقی بیشتری را به‌همراه دارد. با توجه به شکل (۲)، ملاحظه می‌شود که برای همه دبی‌های مورد مطالعه، شدت پیشروی قطر پیاز رطوبتی در ابتدا زیاد بوده و سپس رفته رفته با گذشت زمان کاهش می‌یابد که این امر مشابه با نتیجه رحیم زادگان (۲۱) می‌باشد.

شکل (۲) نشان از ارتباط توانی مقادیر زمان با مقادیر حداکثر قطری که جبهه رطوبتی در زیر خاک برای دبی‌های مختلف ایجاد می‌کند دارد. بنابراین بهترین معادله منحنی برازش یافته بر آن به شکل کلی زیر خواهد بود:

شکل (۲) نشان از ارتباط توانی مقادیر زمان با مقادیر حداکثر قطری که جبهه رطوبتی در زیر خاک برای دبی‌های مختلف ایجاد می‌کند دارد. بنابراین بهترین معادله منحنی برازش یافته بر آن به شکل کلی زیر خواهد بود:

$$d = a t^b \quad [8]$$

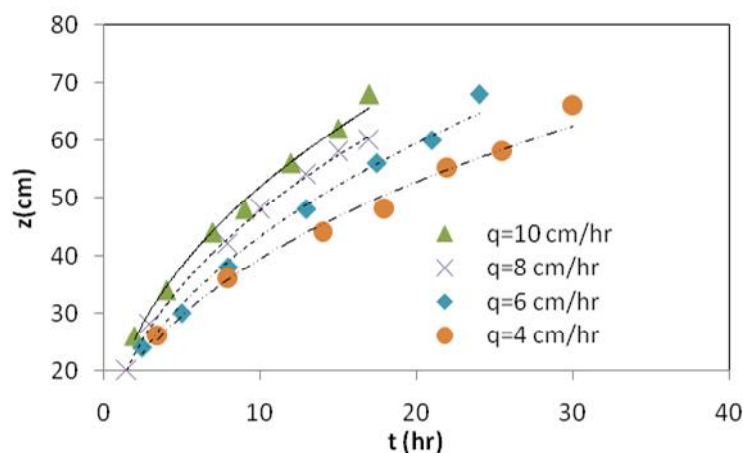
که در رابطه [۸]، d مقدار حداکثر قطر جبهه رطوبتی (cm)، t زمان کارکرد قطره‌چکان (hr) و a و b ضرایب معادله می‌باشند؛ این ضرایب توسط برازش بهترین منحنی به داده‌های حداکثر قطر برازش یافته نسبت به زمان (رابطه توانی در این مطالعه) حاصل می‌شوند. برای تأیید صحت مطالب بیان شده و مناسب بودن منحنی برازشی، کاربرد شاخص‌های مخلف آماری ضروری به‌نظر می‌رسد بنابراین علاوه بر مقادیر مربوط به ضرایب معادله، مقادیر شاخص‌های آماری مربوط به هر معادله نیز در جدول (۱) آورده شده است.

مقادیر شاخص‌های آماری در جدول (۱) ($R > 0/99$).

ب) معادله تعیین عمق پیشروی پیاز رطوبتی در دبی‌های مختلف

برای تعیین معادله عمق پیشروی پیاز رطوبتی در دبی‌های مختلف، مقادیر عمق پیشروی جبهه رطوبتی خاک حاصله از نرم‌افزار، به عنوان تابعی از زمان رسم گردید (شکل ۳).

شکل (۳)، صعودی بودن عمق پیاز رطوبتی تشکیل یافته زیر سطح خاک با گذشت زمان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در زمان ثابت، با افزایش مقدار دبی، شاهد پیشروی بیشتر جبهه رطوبتی به‌صورت عمودی در خاک خواهیم بود. علی‌خان و همکاران (۹)، با بررسی توزیع آب در نیم‌رخ خاک تحت یک منبع نقطه‌ای نتیجه گرفتند که با افزایش دبی قطره‌چکان و حجم آب آبیاری، عمق جبهه رطوبتی افزایش می‌یابد. نتایج نصیری و همکاران (۶) نیز مشابه نتایج حاصله



شکل ۳. تغییرات عمق پياز رطوبتی نسبت به زمان برای دبی‌های مختلف

جدول ۲. ضرایب معادله تعیین عمق پياز رطوبتی برای دبی‌های مختلف به همراه شاخص‌های آماری مربوطه

دبی (cm/hr)	e	f	R	RMSE	MAD
۱۰	۱۸/۶۷	۰/۴۴۳	۰/۹۹۷	۱/۱۳۲	۰/۸۸۰
۸	۱۶/۷۴	۰/۴۵۴	۰/۹۹۹	۰/۵۹۳	۰/۷۲۵
۶	۱۴/۹۸	۰/۴۶۰	۰/۹۹۵	۱/۵۵۳	۱/۱۰۷
۴	۱۵/۱۰	۰/۴۱۶	۰/۹۹۱	۱/۷۷۲	۱/۱۰۴

می‌توان با اطمینان از این قبیل معادلات جهت تعیین ابعاد پياز رطوبتی در زیر سطح خاک که قابل مشاهده نمی‌باشد، کمک گرفت و در مدت زمان خاصی مقدار عمق جبهه رطوبتی زیر یک قطره‌چکان را تخمین زد. البته نباید از نظر دور داشت که معادلات حاصله برای بافت خاصی از خاک بوده و احتمالاً معادلات برای بافت‌های دیگر متفاوت خواهد بود. بنابراین تعیین این معادلات برای بافت‌های مختلف خاک، که موضوع بخش بعدی است، ضروری به نظر می‌رسد.

ج) معادله تعیین حداکثر قطر پياز رطوبتی و عمق آن در بافت‌های مختلف

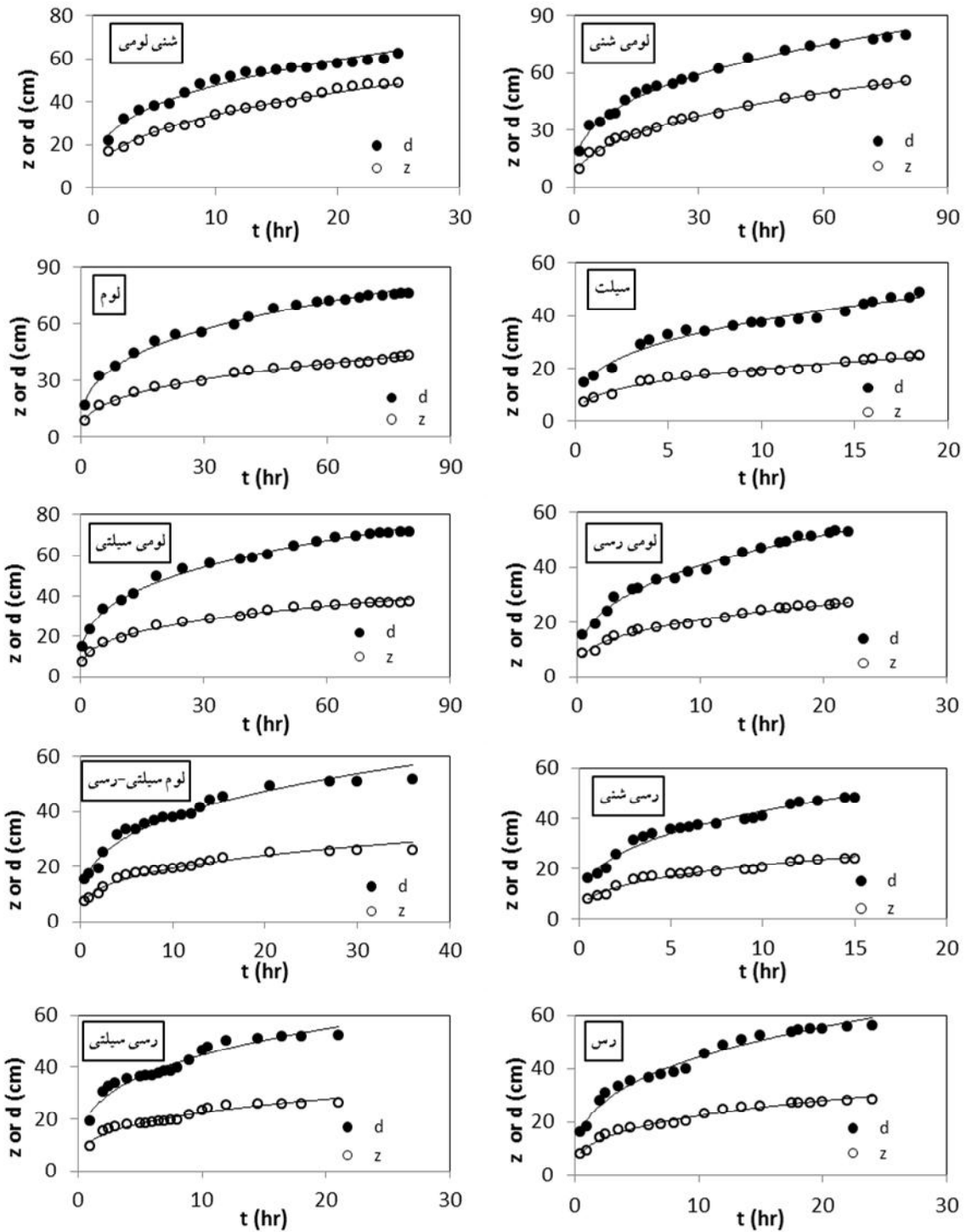
تغییرات مقادیر حداکثر قطر و عمق خیس‌شدگی در محوطه زیر قطره‌چکان برای هر ۱۲ کلاس بافت خاک در دبی ثابت توسط نرم‌افزار اجرا گشته و نتایج حاصله نسبت به زمان رسم گردید شکل (۴). البته لازم به ذکر است که نرم‌افزار در اجرای دو بافت

بود. با توجه به شکل (۳)، ملاحظه می‌شود که برای همه دبی‌های مورد مطالعه، شدت افزایش عمق پياز رطوبتی در ابتدا زیاد بوده و سپس رفته رفته با گذشت زمان کاهش می‌یابد. نتایج حاصله مشابه نتایج رحیم‌زادگان (۲۱) بود. با توجه به این شکل، رابطه توانی بهترین توصیف کننده ارتباط بین عمق پیشروی جبهه رطوبتی و زمان می‌باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$z = e t^f \quad [9]$$

که در این رابطه، z مقدار عمق پیشروی جبهه رطوبتی (cm)، t زمان کارکرد قطره‌چکان (hr) و e و f ضرایب معادله می‌باشند. مقادیر این ضرایب به همراه شاخص‌های آماری مربوطه در جدول (۲) آمده است.

مقادیر شاخص‌های آماری در جدول (۲) ($R > 0/99$)، $RMSE < 1/78$ و $MAD < 1/11$) نشان از دقت بالای معادلات حاصله جهت تعیین عمق پياز رطوبتی تحت منبع نقطه‌ای با یک مقدار دبی خاص دارد. بنابراین با توجه به نتایج حاصله،



شکل ۴. تغییرات حداکثر قطر پیاز رطوبتی و عمق آن نسبت به زمان در بافت‌های مختلف خاک (نقاط، نشان‌دهنده مقادیر حاصله از نرم‌افزار و خطوط، نشان‌دهنده بهترین منحنی برازش یافته می‌باشد)

جدول ۳. ضرایب معادلات تعیین عمق و حداکثر قطر پیاز رطوبتی برای بافت‌های مختلف به همراه شاخص‌های آماری مربوطه

MAE		RMSE		R		ضرایب معادله z		ضرایب معادله d		بافت
معادله z	معادله d	معادله z	معادله d	معادله z	معادله d	i	j	g	h	
۰/۹۴۷	۱/۲۹۶	۱/۰۹۸	۱/۸۷۰	۰/۹۹۴	۰/۹۸۶	۰/۳۸۹	۱۳/۸۱	۰/۳۲۳	۲۲/۵۵	شنی لومی
۰/۸۴۱	۱/۱۸۷	۰/۸۶۹	۱/۶۰۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۶	۰/۴۰۴	۹/۴۴۵	۰/۳۳۶	۱۸/۸۱	لومی شنی
۰/۷۹۷	۱/۱۲۷	۰/۷۲۸	۱/۴۹۱	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۳۵۱	۹/۲۳۵	۰/۳۳۱	۱۸/۴۳	لوم
۰/۸۷۰	۱/۱۶۵	۰/۸۶۹	۱/۶۶۸	۰/۹۸۵	۰/۹۸۴	۰/۳۳۷	۹/۰۴۹	۰/۳۳۱	۱۷/۸۳	سیلت
۰/۷۹۴	۱/۰۰۵	۰/۷۴۵	۱/۲۹۰	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۰/۳۱۹	۹/۴۹۷	۰/۳۱۲	۱۸/۶۹	لومی سیلتی
۰/۷۵۹	۰/۹۸۰	۰/۷۱۳	۱/۱۳۱	۰/۹۹۲	۰/۹۹۵	۰/۳۳۰	۹/۷۵۸	۰/۳۴۶	۱۸/۳۱	لومی رسی
۰/۹۳۲	۱/۳۰۲	۱/۸۲	۲/۵۴	۰/۹۷۸	۰/۹۸۳	۰/۳۱۶	۹/۲۹۳	۰/۳۱۳	۱۸/۵۵	لوم سیلتی-- رسی
۰/۸۴۸	۱/۱۴۶	۰/۸۷۸	۱/۵۸۱	۰/۹۸۳	۰/۹۸۶	۰/۳۳۸	۹/۸۶۱	۰/۳۳۶	۱۹/۷۷	رسی شنی
۰/۹۷۹	۱/۳۷۴	۱/۱۰۲	۲/۱۱۴	۰/۹۶۸	۰/۹۶۹	۰/۳۰۱	۱۱/۲۱	۰/۲۹۷	۲۲/۴۹	رسی سیلتی
۰/۸۶۷	۱/۲۶۳	۰/۸۵۴	۱/۸۲۳	۰/۹۹۰	۰/۹۸۹	۰/۳۲۶	۱۰/۵۱	۰/۳۲۸	۲۰/۷۵	رس

مربوطه جهت تعیین مقادیر حداکثر قطر و عمق جبهه رطوبتی تحت منبع نقطه‌ای در بافت‌های مختلف خاک می‌باشد. توسط نتایج حاصل از جدول (۳) و در نظر گرفتن زمان ثابت دو ساعت برای کارکرد قطره‌چکان، مقدار حداکثر قطر و عمق جبهه رطوبتی در بافت‌های مختلف خاک حاصل شد (جدول ۴).

با توجه به جدول (۴)، مقدار حداکثر قطر جبهه رطوبتی با فرض دو ساعت کارکرد قطره‌چکان در همه بافت‌ها، به ترتیب مربوط به بافت‌های شنی لومی، رسی سیلتی، رس، رسی شنی، لومی شنی، لومی رسی، لومی سیلتی، لوم، لوم سیلتی-رسی و سیلت می‌باشد. اگر جای بافت‌های رسی شنی و لومی شنی با هم عوض شود، همین ترتیب را برای عمق جبهه پیشروی خواهیم داشت.

نتیجه‌گیری

افزایش سرعت محاسبه‌گرها و نیز افزایش قابلیت مدل‌های عددی، لزوم استفاده از این مدل‌ها در رابطه با مسائل آب و

خاک شن و لوم‌شنی-رسی ناتوان بود و نتایج معقولی ارائه نداد. با توجه به شکل (۴) مشخص است که در همه بافت‌ها، مقادیر حداکثر قطر و عمق جبهه رطوبتی با گذشت زمان سیر صعودی داشته و در یک زمان ثابت، مقدار حداکثر قطر پیاز رطوبتی تشکیل یافته تحت منبع نقطه‌ای بیشتر از عمق بوده است. شکل (۴) گویای رابطه توانی مقادیر حداکثر قطر و عمق جبهه رطوبتی با مقادیر زمان است. بنابراین روابط حاصله از بهترین برازش روی منحنی مربوطه به دو شکل زیر خواهد بود:

$$d = g t^h \quad [10]$$

$$z = i t^j \quad [11]$$

که در این روابط، d حداکثر عمق جبهه رطوبتی برای هر بافت خاک در دبی ثابت (cm)، z مقدار عمق پیشروی جبهه رطوبتی برای هر بافت خاک در دبی ثابت (cm)، t زمان کارکرد قطره‌چکان (hr) و g, h, i, j ضرایب معادله می‌باشند. مقادیر این ضرایب به همراه شاخص‌های آماری مربوطه در جدول (۳) آمده است.

مقادیر شاخص‌های آماری در جدول (۳) ($R > 0/96$)، $RMSE < 2/12$ و $MAD < 1/38$) نشان‌دهنده دقت بالای معادلات

جدول ۴. مقدار حداکثر قطر و عمق جبهه رطوبتی در بافت‌های مختلف خاک در زمان کارکرد دو ساعت

z	d	بافت
۱۸/۰۸۴	۲۸/۲۰۸	شنی لومی
۱۲/۴۹۷	۲۳/۷۴۳	لومی شنی
۱۱/۷۷۹	۲۳/۱۸۳	لوم
۱۱/۴۳۰	۲۲/۴۲۸	سیلت
۱۱/۸۴۷	۲۳/۲۰۲	لومی سیلتی
۱۲/۲۶۶	۲۳/۲۷۳	لومی رسی
۱۱/۵۶۹	۲۳/۰۴۴	لوم سیلتی-رسی
۱۲/۴۶۴	۲۴/۹۵۵	رسی شنی
۱۳/۸۱۱	۲۷/۶۳۱	رسی سیلتی
۱۳/۱۷۵	۲۶/۰۴۷	رس

ارائه شده توسط افرادی مثل شوارتزمن و زور (۲۲)، میرزایی و همکاران (۵)، پلنگی و آخوندعلی (۲)، ساده بودن آنها و وابسته بودن آنها تنها به یک پارامتر (زمان) می‌باشد. نتایج شاخص‌های آماری مربوط به این معادلات نشان‌دهنده دقت بالای معادلات حاصله بود. بنابراین از چنین معادلاتی می‌توان در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای بهره گرفت.

خاک را آشکارتر می‌سازد. نرم‌افزار HYDRUS-2D یکی از این مدل‌هاست که بر اساس بیان محققان، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد (۳، ۱۲، ۱۷، ۲۰، ۲۵، ۲۶) و می‌تواند روشی مناسب جهت مدل نمودن ابعاد جبهه رطوبتی شکل گرفته زیر قطره‌چکان باشد.

برقراری رابطه توانی بین نتایج حاصل از نرم‌افزار برای حداکثر عمق و جبهه رطوبتی در زمان‌های مختلف، امکان ارائه معادلاتی ساده جهت تعیین حداکثر قطر و عمق جبهه رطوبتی را فراهم نمود. مزیت اصلی این معادلات نسبت به معادلات

منابع مورد استفاده

۱. اکرام‌نیا، ف. ۱۳۷۵. ارزیابی انواع قطره‌چکان‌ها و ارایه قطره‌چکان بهینه از لحاظ اقتصادی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
۲. پلنگی، ج. ع. و ع. م. آخوندعلی. ۱۳۸۷. یک مدل نیمه تجربی به منظور تخمین ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، تحت منبع نقطه‌ای. مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۱۲(۴۵): ۸۵-۹۵.
۳. خان‌محمدی، ن. ح. رضایی، س. بشارت و ج. بهمنش. ۱۳۹۱. ارزیابی شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای براساس مشخصات هیدرولیکی خاک و اندازه‌گیری‌های میدانی. مجله‌ی آبیاری و زهکشی ایران ۶(۳): ۱۸۷-۱۹۵.

۴. زارع‌ایبانه، ح.، ا. فرخی، م. وظیفه‌دوست و خ. اژدری. ۱۳۸۹. برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای در مزرعه پیاز. مجله‌ی آب و خاک ۲۴(۶): ۱۱۹۷-۱۲۰۹.
۵. میرزایی، ف.، ع. لیاقت، ت. سهرابی و م. ح. امید. ۱۳۸۴. نمون‌سازی جبهه رطوبتی خاک از منبع تغذیه خطی در آبیاری قطره‌ای-نواری. مجله‌ی تحقیقات مهندسی کشاورزی ۶(۲۳): ۵۳-۶۶.
۶. نصیری، ش.، ع. نشاط و م. کهنوجی. ۱۳۹۰. تعیین معادله‌های تجربی برآورد ابعاد پیاز رطوبتی تحت آبیاری قطره‌ای در خاک‌های متوسط-شنی (مطالعه موردی: دشت قائم‌آباد، کرمان). مجله‌ی مهندسی منابع آب ۴: ۸۷-۹۸.
۷. نوروزی، م. و م. زلفی‌باوریانی. ۱۳۸۹. تعیین آب مورد نیاز خرما در روش آبیاری قطره‌ای در استان بوشهر. مجله‌ی پژوهش آب در کشاورزی ۲۴(۱): ۲۱-۳۰.
8. Adeboye, O. B. and M. O. Alatis. 2007. Performance of probability distributions and plotting positions in estimating the flood of River Osun at Apoje Sub-basin, Nigeria. *Int. J. Agr. Eng.* 9: 1-21.
9. Alikhan, A., M. Yitayev and W. Warrick. 1996. Field evaluation of water and solute distribution from a point source. *J. Irrig. Drain. Engin.* 122: 221-227.
10. Angelakis, A. N., D. E. Rolston, T. N. Kadir and V. N. Scott. 1993. Soil-water distribution under trickle source. *J. Irrig. Drain. Eng.* 199: 484-500.
11. Assouline, S. 2002. The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 66: 1630-1636.
12. Ben-Gal, A., N. Lazarovitch and U. Shani. 2004. Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. *J. Vadose Zone* 3: 1407-1413.
13. Cook, F. J., P. J. Thorburn, P. Fitch and K. L. Bristow. 2003. Wet Up: a software tool to display approximate wetting pattern from drippers. *J. Irrig. Sci.* 22: 129-134.
14. Cook, F. J., P. Fitch, P. J. Thorburn, P. B. Charlesworth and K. L. Bristow. 2006. Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *J. Environ Model Soft* 21: 1353-1359.
15. Cote, C. M., K. L. Bristow, P. B. Charlesworth, F. J. Cook and P. J. Thorburn. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *J. Irrig. Sci.* 22: 143-156.
16. Gardenas, A., J. W. Hopmans, B. R. Hanson and J. Simunek. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under microirrigation. *J. Agric. Water Manage.* 74: 219-242.
17. 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. *J. Agr. Water Manage.* 97: 1070-1076.
18. Li, J., J. Zang and M. Rao. 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *J. Agr. Water Manage.* 67: 89-104.
19. Mmolawa, K. and D. Or. 2003. Experimental and numerical evaluation of an analytical volume balance model for soil water dynamics under drip irrigation. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 67: 1657-1671.
20. Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133: 342-349.
21. Rahimzadegan, R. 1977. Water movement in field soil from a point source. Master. Degree Thesis, Agricultural and Irrigation Engineering, Faculty of Agriculture, Utah State University.
22. Schwartzman, M. and B. Zur. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *J. Irrig. Drain. Eng.* 112: 242-253.
23. Shabri, A. 2002. A comparison of plotting formulas for the Pearson type III distribution. *J. Teknol.* 36: 61-74.
24. Simunek, J., M. Sejna and M. Th. Van Genuchten. 2006. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual, Version 1. PC Progress, Prague, Czech Republic.
25. Siyal, A. A. and T. H. Skaggs. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe subsurface irrigation. *J. Agr. Water Manage.* 96: 893-904.
26. Skaggs, T. H., T. J. Trout, J. Simunek and P. J. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J. Irrig. Drain. Eng.* 30: 304-310.
27. Thabet, M. and Kh. Zayani. 2008. Wetting patterns under trickle source in a loamy sand soil of south Tunisia. *Am. Euras. J. Agric. Environ. Sci.* 3: 38-42.
28. Yahaya, A. S., C. S. Yee, N. A. Ramli and F. Ahmad. 2012. Determination of the best probability plotting position for predicting parameters of the Weibull distribution. *Int. J. Appl. Sci. Technol.* 2: 106-111.

Empirical simulation of wetting pattern in different soil texture

N. Khanmohamadi and S. Besharat^{1*}

(Received: May 17-2014 ; Accepted : April 9-2016)

Abstract

Accurate design of drip irrigation systems requires sufficient understanding of horizontally and vertically distribution of water flow in soil and modeling the wetting pattern dimensions created under the drip source. Field and laboratory activities are not suitable for this purpose considering their time and financial constraints and it is necessary to apply accurate software for determination of several equations in different situations. This research aimed to present simple models for calculation of wetting pattern dimensions in different discharges and structures in drip irrigation system. For this purpose, HYDRUS-2D model was implemented for four discharges in the same soil texture and different soil textures in the same discharge. The values obtained from running the software such as depth and maximum diameter of wetting pattern have been fitted with time values and corresponding equations were obtained. The results of statistical indices for all obtained equations ($R > 0.96$, $RMSE < 2.12$ and $MAD < 1.38$) represent suitable accuracy of corresponding equations in determination of pattern dimensions under the drip source. The results also showed that Loamy Sand and Silt textures, respectively, have maximum and minimum depth and wetting pattern diameter.

Keywords: drip irrigation, HYDRUS-2D model, wetting pattern dimensions.

1. Dept. of Water Eng., Faculty of Agr., Univ of Urmia., Urmia, Iran.

* Corresponding Author, Email: s.besharat@urmia.ac.ir