تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۷، مهر ۱۴۰۰ (ص ۱۹۱۳-۱۹۰۳)
DOI: 10.22059/ijswr.2021.322796.668947
(علمی – پژوهشی)

Modeling Soil Wetting Patterns under Pulsed Drip Irrigation by Dimensional Analysis Method and Comparison with HYDRUS-2D Numerical Model

SANAZ MOHAMMADI[1], SEYED MAJID MIRLATIFI[1*], HOSSEIN DEHGHANISANIJ[2], IMAN HAJIRAD[1], MEHDI HOMAEE[1]

1. Water Management and Engineering Department, Collage of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Alborz, Iran.

(Received: May. 7, 2021- Revised: June. 4, 2021- Accepted: June. 15, 2021)

ABSTRACT

The optimal design, operation and management of drip irrigation systems relies significantly on selection of a suitable combination of emitter discharge rate, emitter and lateral spacing, root depth and soil hydraulic properties that should be in consistent with root growth pattern in the soil for delivering required amount of water and nutrition to the plant. Modeling soil wetting pattern is more practical and easier than the conducting laboratory or field measurements. In this study, an empirical model was developed to predict the dimensions of the wetting pattern under pulsed drip irrigation using dimensional analysis method. The main inputs of the proposed model are emitter discharge rate, saturated hydraulic conductivity, total volume of applied water and pulse ratio. Experimentations included determination of the maximum depth and width of the wetting pattern after water application under different combination of pulses in a clay soil. The treatments were consisted of three pulses (P2, P3, P4) and two Off-Time durations (T1, T2). The predicted values of wetted depth and width by the empirical model and the HYDRUS-2D model were compared with the observations. The coefficient of determination parameter for the measured and estimated wetting pattern dimensions that obtained from empirical model was 0.94 and 0.93 and for numerical model was 0.95 and 0.97, which indicates good accuracy of the models. The results of the T-test analysis indicated that the empirical and numerical model simulated values were not significantly different (with a probability of 99.5%) from the observed ones. Although, on the basis of RMSE, ME and EF parameters the HYDRUS-2D model performance was better than the proposed empirical model but due to the simplicity of use and requiring less number of input parameters, it is recommended to use the developed empirical model to predict the wetting pattern as required in the design of drip irrigation systems.

Keywords: Buckingham’s Theorem, Off-Time, Pulsed Management, Wetted Depth, Wetted Zone.

*Corresponding Author’s Email: Mirlat_m@modares.ac.ir

مدل‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای پالسی به‌روش آنالیز ابعادی و مقایسه با مدل عددی HYDRUS-2D

ساناز محمدی[۱]، سید مجید میرلطیفی[۱*]، حسین دهقانی سانیج[۲]، ایمان حاجی‌راد[۱]، مهدی همایی[۱]

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۷- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۱۴- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۲۵)

چکیده

طراحی، بهره‌برداری و مدیریت بهینه سیستم‌های آبیاری قطره‌ای نیازمند کاربرد ترکیب مناسبی از پارامترهایی مانند دبی قطره‌چکان‌ها، فاصله بین قطره‌چکان‌ها و لاترال‌های آبیاری، عمق توسعه ریشه و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است که مطابق با الگوی رشد ریشه در خاک باشند تا آب و مواد غذایی به‌مقدار نیاز در اختیار گیاه قرار گیرد. مدل‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی اطراف یک قطره‌چکان آبیاری ساده‌تر و کاربردی‌تر از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یا مزرعه‌ای است، بنابراین در پژوهش حاضر یک مدل تجربی برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی تحت سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی با روش آنالیز ابعادی ارائه شد. مدل تجربی توسعه یافته شامل معادلاتی براساس دبی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، حجم آب کاربردی و نسبت پالس آبیاری برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی می‌باشد. آزمایش‌های لازم برای تعیین حداکثر عمق و عرض پیاز رطوبتی در زمان‌های مختلف پس از شروع آبیاری در یک خاک رسی انجام گردید. تیمارهای مدیریت پالسی در سه سطح (دو، سه و چهار پالس آبیاری) و زمان‌بندی قطع جریان در دو سطح (یک و سه برابر زمان وصل جریان) اعمال شدند. مقادیر عمق و عرض پیاز رطوبتی برآوردی توسط مدل تجربی و عددی HYDRUS-2D با مقادیر مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفتند. پارامتر ضریب تعیین (R^2) برای مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردی عمق و عرض پیاز رطوبتی در مدل تجربی ۰/۹۴ و ۰/۹۳ و در مدل عددی ۰/۹۵ و ۰/۹۷ به‌دست آمد که حاکی از دقت مناسب هردو مدل در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی است. هم‌چنین نتایج آنالیز آماری آزمون تی‌استیودنت نشان داد که با احتمال ۹۹/۵ درصد اختلاف معنی‌داری بین مقادیر برآوردی مدل تجربی و مقادیر مشاهداتی وجود ندارد. مقادیر آماره‌های RMSE، ME و EF حاکی از دقت بالاتر مدل عددی HYDRUS-2D در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی بود، ولی باتوجه به سهولت کاربرد و نیاز به پارامترهای ورودی کم‌تر استفاده از مدل تجربی در طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای پالسی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: قضیه باکینگهام، مدیریت پالسی، جبهه رطوبتی، عمق خیس‌شدگی، فاز استراحت.

مقدمه

اطلاع از الگوی خیس شدگی اطراف قطره‌چکان‌ها در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در خاک‌های مختلف و تحت دبی‌های آبیاری متفاوت برای طراحی و بهره‌برداری کارآمدتر از این سیستم‌ها، اطمینان از تحویل دقیق آب و مواد غذایی به منطقه توسعه ریشه گیاه، برنامه‌ریزی آبیاری و منطبق کردن الگوی خیس شدگی خاک با الگوی رشد ریشه گیاه مورد نیاز می‌باشد (Kandelous & Simunek, 2010b; Thurborn *et al.*, 2003; Lubana *et al.*, 2002). عمق پیاز رطوبتی در خاک باید با عمق منطقه توسعه ریشه گیاه متناسب باشد و عرض پیاز رطوبتی با فاصله بین قطره‌چکان‌ها و فاصله لترال‌های آبیاری در ارتباط است. ابعاد پیاز رطوبتی را می‌توان از طریق اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای حجم خیس شده خاک یا با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به‌دست آورد. اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای علاوه‌بر این‌که زمان‌بر و هزینه‌بر می‌باشند، محدود به شرایط منطقه مورد آزمایش هستند. اغلب مدل‌های شبیه‌سازی نیز نیازمند اطلاعات دقیق و جزئی درباره ویژگی‌های فیزیکی خاک هستند، بنابراین برای استفاده‌های معمول کاربردی نمی‌باشند (Dasberg and Or, 1999). مدل‌های زیادی برای تعیین ابعاد پیاز رطوبتی اطراف یک قطره‌چکان آبیاری ارائه شده است، متداول‌ترین آن‌ها مدل‌های عددی همچون HYDRUS 2D,3D، مدل‌های تحلیلی مانند WetUP و مدل‌های تجربی می‌باشند. مدل‌های عددی و تحلیلی از حل معادله ریچاردز تحت شرایط اولیه و مرزی خاصی حاصل شده‌اند. مدل‌های تحلیلی همچون WetUP یک روش آسان و سریع برای تعیین

* نویسنده مسئول: Mirlat_m@modares.ac.ir

موقعیت پیاز رطوبتی در خاک با فرض منبع نقطه‌ای می‌باشند، درحالی‌که مدل‌های عددی فرضیات کم‌تری دارند ولی به قدرت محاسباتی قابل توجهی نیاز دارند. مدل‌های تجربی را با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیونی برای داده‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی می‌توان استخراج کرد. این مدل‌ها معمولاً عمق و عرض پیاز رطوبتی را به‌صورت تابعی از خواص هیدرولیکی خاک و دبی قطره‌چکان‌ها برآورد می‌کنند (Subbaiah, 2013).

Schwartzman and Zur (1986) یک روش نیمه‌تجربی ساده برای تخمین ابعاد پیاز رطوبتی حاصل از یک سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به‌روش آنالیز ابعادی، معادلاتی را برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی براساس کل حجم آب کاربردی، دبی قطره‌چکان و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ارائه کردند که پیچیدگی روش‌های عددی و تحلیلی را ندارد. Amin and Ekhmaj (2006) با استفاده از چهار سری داده آزمایشی ارائه شده در مقالات دیگر پژوهشگران، به روش رگرسیون غیرخطی، معادلاتی را برای برآورد فاصله افقی و عمودی جبهه رطوبتی از محل یک قطره‌چکان سطحی با در نظر گرفتن شاخص رطوبت خاک که در معادلات Schwartzman and Zur (1986) لحاظ نشده بود، ارائه کردند. Singh *et al.*, (2006) نیز مدل ارائه شده توسط Schwartzman and Zur (1986) را برای شرایط آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تصحیح کرده و پارامتر عمق نصب قطره‌چکان را در معادلات خود لحاظ کردند. Kandelous *et al.*, (2008) پارامتر عمق پیاز رطوبتی ارائه شده در مدل Singh *et al.*, (2006) را برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به دو پارامتر عمق خیس شده در بالای قطره‌چکان و عمق خیس شده در پایین قطره‌چکان تفکیک کردند.

Malek *et al.*, (2011) مدل تجربی جدیدی را برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای سطحی ارائه کردند که علاوه بر پارامترهای لحاظ شده در معادلات تجربی قبلی پارامتر چگالی ظاهری خاک را نیز شامل می‌شد. Al-Ogaidi *et al.*, (2016) نیز مدل تجربی پیشرفته‌ای را برای شبیه‌سازی کل پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای سطحی برای خاک همگن و لایه‌بندی شده ارائه کردند، درحالی‌که مدل‌های پیشین تنها قادر به برآورد شعاع خیس‌شدگی در سطح خاک و عمق پیاز رطوبتی در خاک همگن بودند. هم‌چنین در تکمیل معادلات تجربی ارائه شده قبلی، این محققین به‌منظور در نظر گرفتن تأثیر بافت خاک در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی، پارامترهای درصد شن، رس و سیلت خاک را به معادلات خود اضافه کردند.

Kandelous and Simunek (2010a) عملکرد مدل عددی HYDRUS-2D، مدل تحلیلی WetUp و سه مدل تجربی ارائه شده توسط Schwartzman and Zur (1986)، Amin and Ekhmaj (2006) و Kandelous *et al.*, (2008) را برای برآورد ابعاد الگوی خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه اندازه‌گیری‌های لایسمتری با نتایج مدل‌های شبیه‌سازی نشان داد که برای نوبت آبیاری اول که پروفیل خاک به‌طور یکنواخت خشک بود عملکرد مدل عددی HYDRUS-2D و مدل تجربی کندلوس بهتر از مدل تحلیلی WetUp می‌باشد. هم‌چنین مقایسه اندازه‌گیری‌های مزرعه ای با مقادیر شبیه‌سازی شده مدل‌ها نشان داد که مدل عددی HYDRUS-2D و مدل تجربی Amin and Ekhmaj (2006) برآوردهای بهتری نسبت به مدل‌های دیگر ارائه می‌کنند، چرا که یکی از ورودی‌های مدل HYDRUS-2D پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشد که بیانگر ویژگی‌های خاک موردنظر است و مدل تجربی Amin and Ekhmaj (2006) نیز از پارامتر $\Delta\theta$ که بیانگر تغییرات متوسط رطوبت خاک است استفاده می‌کند.

Mirzaei *et al.*, (2020) نیز مدلی را برای برآورد ابعاد بخش مرطوب خاک لایه‌دار تحت سیستم آبیاری قطره‌ای با منبع نقطه‌ای با استفاده از آنالیز ابعادی ارائه کردند. بررسی‌های آماری نشان داد که معادلات تجربی ارائه شده برای خاک‌های لایه‌دار تطابق مناسبی با مقادیر واقعی نشان می‌دهند. Karimi *et al.*, (2015) روابطی را برای پیش‌بینی توزیع مجدد رطوبت در جهت افقی و عمودی الگوی خیس‌شدگی بعد از زمان قطع آبیاری با استفاده از روش آنالیز ابعادی به‌صورت تابعی از حجم آب کاربردی، هدایت هیدرولیکی خاک و مدت زمان سپری شده بعد از پایان آبیاری ارائه کردند. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل ارائه شده با دقت بالایی الگوی توزیع مجدد را پس از پایان آبیاری پیش‌بینی می‌کند. Zandi *et al.*, (2020) نیز معادلاتی را برای تعیین ابعاد حجم خاک مرطوب شده در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از منبع نقطه‌ای با استفاده از روش آنالیز ابعادی ارائه کردند. نتایج نشان داد که راندمان عملکرد در تمام موارد بزرگ‌تر از ۸۱ درصد بود و می‌توان از معادلات ارائه شده با دقت کافی برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی استفاده کرد. Eskandari Tadavani *et al.*, (2020) دقت مدل عددی Hydrus-2D و مدل تجربی حاصل از پژوهش (مدل رگرسیونی چند متغیره غیرخطی) را در برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی در یک خاک لوم رسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج شاخص‌های آماری نشان داد که تفاوت چندانی بین نتایج مدل‌ها و مقادیر مشاهداتی وجود ندارد.

معادلات تجربی ارائه شده در تحقیقات پیشین برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در شرایط آبیاری پیوسته صادق بودند. لذا

Ismail *et al.*, (2014) معادلات ارائه شده توسط Schwartzman and Zur (1986) را برای آبیاری قطره‌ای سطحی در شرایط مدیریت پالسی در خاک شنی اصلاح کردند. مدیریت پالسی شامل یک سری چرخه‌های آبیاری است که هر چرخه شامل یک فاز آبیاری[1] (وصل) و یک فاز استراحت[2] (قطع) است (Karmeli and Peri, 1974). پژوهشگران با استفاده از آنالیز ابعادی معادلاتی را برای برآورد عمق و عرض پیاز رطوبتی در حالت آبیاری پالسی و پیوسته در خاک شنی به‌صورت تابعی از دبی قطره‌چکان، زمان آبیاری و هدایت هیدرولیکی اشباع ارائه کردند. در این راستا Mohammadbeigi *et al.*, (2017) نیز معادلاتی را با استفاده از آنالیز ابعادی برای برآورد الگوی خیس‌شدگی خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای پیوسته و پالسی برای سه بافت خاک مختلف ارائه کردند. در روش پالسی پس از هر یک ساعت آبیاری یک ساعت استراحت یا قطع آبیاری اعمال شد. ارزیابی شاخص‌های آماری نشان داد که معادله‌های پیشنهادی از اعتبار قابل ملاحظه‌ای برخوردارند. معادلات ارائه شده در این پژوهش شامل پارامتری که بیان‌گر مدیریت پالسی در آبیاری قطره‌ای باشد، نیست. Karimi and Karimi (2019) روابطی را برای تخمین سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در سامانه آبیاری قطره‌ای پالسی با استفاده از رگرسیون غیرخطی ارائه کردند. نتایج مقایسه بین مقادیر اندازه-گیری و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل رگرسیون غیرخطی با دقت بالایی سرعت پیشروی جبهه رطوبتی را برآورد می‌کند.

با توجه به این‌که تاکنون مطالعه جامع و کاملی در رابطه با ارائه معادلات برآورد ابعاد پیاز رطوبتی تحت شرایط اعمال مدیریت‌های مختلف آبیاری قطره‌ای پالسی انجام نشده است، لذا در پژوهش حاضر یک مدل تجربی جدید برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در خاک رسی تحت سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی با منبع نقطه‌ای و زمان قطع و وصل جریان مختلف با درنظر گرفتن پارامتر نسبت پالس در معادلات، ارائه گردید.

مواد و روش‌ها

توصیف مدل فیزیکی

آزمایش‌های مربوط به پژوهش حاضر در آزمایشگاه آبیاری و زهکشی گروه مهندسی و مدیریت آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد. بدین‌منظور از یک مدل فیزیکی شامل جعبه‌ای با ابعاد ۹۰×۹۰×۱۲۰ سانتی‌متر مطابق شکل (۱) برای شبیه‌سازی توزیع آب در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی (سطحی) استفاده شد. دو وجه جعبه از ورقه‌های شفاف پلکسی‌گلس ساخته شده بود که امکان مشاهده نحوه پیش‌روی جبهه رطوبتی خاک در زمان‌های مختلف انجام آزمایش را فراهم می‌کرد و دو وجه دیگر از جنس ورقه‌های فلزی بود. برای جلوگیری از ایجاد جریان ترجیحی در محل تماس خاک با بدنه جعبه، دیواره پلکسی‌گلس با چسب شفاف و شن استاندارد زبر گردید. بافت خاک مورد استفاده در پژوهش به روش هیدرومتری تعیین شد (جدول ۱). به‌منظور ایجاد چگالی ظاهری مورد نظر، پر کردن جعبه به‌صورت اضافه کردن لایه‌های پنج سانتی‌متری از خاک وزن شده انجام شد.

شکل ۱- شمایی از مدل فیزیکی و خطوط پیش‌روی جبهه رطوبتی

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک مورد مطالعه

شن (٪)	رس (٪)	سیلت (٪)	بافت خاک	چگالی ظاهری (gr/cm^3)	رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (٪)	رطوبت حجمی پژمردگی دائم (٪)
۳۸/۶	۴۴/۴	۱۷	رسی	۱/۴۹	۳۶	۲۵

آب توسط پمپ و از طریق لوله‌های نیمه‌اصلی به قطر ۴۰ میلی‌متر و لاترالی به قطر ۲۰ میلی‌متر به قطره‌چکان آبیاری که روی سطح خاک قرار داشت، منتقل گردید. در مسیر انتقال آب از شیرفلکه برای هدایت جریان، فشارسنج برای کنترل فشار ثابت در سیستم، کنتور حجمی برای کنترل حجم آب ورودی در هر آزمایش و شیر قطع و وصل جریان برای کنترل جریان به داخل جعبه استفاده شد. دبی قطره‌چکان مورد استفاده در این پژوهش ۳/۴ لیتر در ساعت بود که با توجه به کم‌بودن دبی مورد استفاده، به‌منظور کاهش فشار وارده بر سیستم از یک لوله برگشت جریان مازاد[3] نیز استفاده گردید. با فرض متقارن بودن پیاز رطوبتی

1. Bypass

1.On-Times
2.Off -Times

تشکیل شده در اطراف قطره‌چکان آبیاری، در پژوهش حاضر نصف پیاز رطوبتی تشکیل شده در خاک شبیه‌سازی شد (Li *et al.*, 2004). تیمارهای مورد بررسی شامل شش تیمار آبیاری قطره‌ای با مدیریت‌های مختلف جریان پالسی بود. تیمارهای مدیریت پالسی در سه سطح شامل دو، سه و چهار پالس آبیاری (P2, P3, P4) و تیمارهای مدیریت زمان‌بندی قطع جریان در دو سطح یک و سه برابر زمان وصل جریان (T1, T2) اعمال شد (جدول ۲). مدت زمان اجرای آزمایش برای تمامی تیمارها ۳ ساعت منظور گردید و حجم آب کاربردی برای همه تیمارها یکسان بود. در هر آبیاری جبهه رطوبتی در فواصل زمانی نیم ساعت از شروع آزمایش بر روی دیواره شفاف جعبه رسم گردید و بدین ترتیب ابعاد جبهه رطوبتی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری جبهه رطوبتی خاک در زمان‌های مختلف، شکل جبهه رطوبتی با استفاده از ماژیک بر روی دیواره شفاف ترسیم و سپس با استفاده از کاغذ کالک از روی آن کشیده شد و ابعاد پیش‌روی جبهه رطوبتی اندازه‌گیری گردید (شکل ۱).

جدول ۲- تیمارهای آبیاری مورد بررسی در جعبه آزمایشی

تیمارهای آزمایشی	مدت زمان وصل جریان در یک چرخه (دقیقه)	مدت زمان قطع جریان در یک چرخه (دقیقه)	کل مدت زمان آبیاری (ساعت)	نسبت پالس
T1 P2	۹۰	۹۰	۴/۵	۰/۶۷
T1 P3	۶۰	۶۰	۵	۰/۶
T1 P4	۴۵	۴۵	۵/۲۵	۰/۵۷
T2 P2	۹۰	۲۷۰	۷/۵	۰/۴
T2 P3	۶۰	۱۸۰	۹	۰/۳۳
T2 P4	۴۵	۱۳۵	۹/۷۵	۰/۳۱

تئوری مدل تجربی

در پژوهش حاضر برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی از روش آنالیز ابعادی و قضیه باکینگهام استفاده شد. دبی جریان خروجی از قطره‌چکان (q)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s)، حجم آب ورودی به خاک (∀) و نسب زمان فاز آبیاری به کل زمان آبیاری یعنی نسبت پالس[1] (PR) به‌عنوان پارامترهای فیزیکی مؤثر بر ابعاد پیاز رطوبتی تحت مدیریت آبیاری قطره‌ای پالسی در نظر گرفته شد. با استفاده از روش آنالیز ابعادی تابع مربوطه به شکل زیر ارائه گردید:

$$F\left(q,\ K_{s,}\ \forall, PR, D, W\right) = 0 \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

$$PR = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

در رابطه (۱) شش کمیت مؤثر ($N = 6$) وجود دارد که دارای دو کمیت یا بُعد اصلی $n = 2$ می‌باشند، بنابراین $(N - n)$ چهار کمیت بدون بُعد یا مستقل خواهیم داشت. تابع جدید و مستقل π به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

$$\pi_1 = PR \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

$$\pi_2 = \frac{W}{D} \qquad \text{(رابطه ۵)}$$

$$\pi_3 = \frac{\forall}{D^3} \qquad \text{(رابطه ۶)}$$

$$\pi_4 = \frac{K_s}{q} \times D^2 \qquad \text{(رابطه ۷)}$$

ترکیب ترم‌های بدون بُعد یک ترم بدون بُعد خواهد بود بنابراین خواهیم داشت:

پارامتر بدون بُعد حجم آب ورودی به خاک:

$$\forall^* = \pi_1 \times \pi_3 \times \sqrt{\pi_4{}^3} = \left[(PR) \times \sqrt{\left(\frac{K_s}{q}\right)^3}\right] \times \forall \qquad \text{(رابطه ۸)}$$

پارامتر بدون بُعد عمق خیس‌شدگی پیاز رطوبتی اطراف قطره‌چکان:

$$D^* = \pi_1 \times \sqrt{\pi_4} = \left[(PR) \times \sqrt{\frac{K_s}{q}}\right] \times D \qquad \text{(رابطه ۹)}$$

پارامتر بدون بُعد عرض خیس‌شدگی پیاز رطوبتی اطراف قطره‌چکان:

$$W^* = \pi_1 \times \pi_2 \times \sqrt{\pi_4} = \left[(PR) \times \sqrt{\frac{K_s}{q}}\right] \times W \qquad \text{(رابطه ۱۰)}$$

Schwartzman and Zur (1986) فرض کردند روابط زیر بین پارامترهای بدون بُعد عمق و عرض خیس‌شدگی پیاز رطوبتی و حجم آب کاربردی برقرار است:

$$D^* = a_1 \forall^{*b_1} \qquad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$W^* = a_2 \forall^{*b_2} \qquad \text{(رابطه ۱۲)}$$

با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده عمق و عرض پیاز رطوبتی و حجم آب کاربردی متناظر در هر تیمار آزمایشی و مشخص بودن سایر پارامترها می‌توان مقادیر پارامترهای D^* و $\forall^*$

2. Pulse Ratio

و W^* را از معادلات (۸) تا (۱۰) محاسبه کرد. سپس با رسم نمودار گرافیکی متناظر با معادلات (۱۱) و (۱۲) ضرایب و توان‌های معادلات به دست می‌آیند که در نهایت با به‌دست آمدن این ضرایب و جایگذاری مقادیر D^* و W^* و $\forall^*$ در معادلات (۱۱) و (۱۲) روابط زیر حاصل می‌شود:

(رابطه ۱۳)

$$D = a_1 \forall^{b_1} \left[(CR)^{b_1 - 1} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{\left(\frac{3}{2}(b_1) - \frac{1}{2}\right)} \right]$$

(رابطه ۱۴)

$$W = a_2 \forall^{b_2} \left[(CR)^{b_2 - 1} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{\left(\frac{3}{2}(b_2) - \frac{1}{2}\right)} \right]$$

توصیف مدل عددی HYDRUS-2D

به‌منظور شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک از مدل عددی HYDRUS-2D استفاده گردید که یکی از مدل‌های پیشرفته در شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد و توسط Simunek *et al.*, 2018 در آزمایشگاه شوری خاک امریکا توسعه داده شده است. این مدل شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال-انتشار برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک است. معادلات مربوطه به روش عناصر محدود در مدل حل شده‌اند. این مدل توانایی تخمین خصوصیات خاک به‌روش معکوس را دارد. در این مدل حرکت دوبعدی آب در خاک با فرض خاک هم‌روند و یکنواخت با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز به‌صورت زیر بیان می‌شود (Simunek *et al.*, 2008):

(رابطه ۱۵)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[k(h)\frac{\partial h}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[k(h)\frac{\partial h}{\partial y} + k(h)\right]$$

در این رابطه θ رطوبت حجمی خاک $\left(\frac{cm^3}{cm^3}\right)$، K هدایت هیدرولیکی خاک $\left(\frac{cm}{min}\right)$، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (cm)، t زمان (min) و x و y به‌ترتیب مختصات افقی و عمودی (cm) می‌باشند. برای به‌دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل از معادله معلم-وان‌گنوختن[1] به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

(رابطه ۱۶)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \dfrac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases}$$

(رابطه ۱۷)

$$k(h) = k_s\, s_e^l \left[1 - \left(1 - s_e^{1/m}\right)^m\right]^2$$

(رابطه ۱۸)

$$s_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \qquad m = 1 - \frac{1}{n}$$

که در این روابط θ_s رطوبت اشباع خاک $\left(\frac{cm^3}{cm^3}\right)$، θ_r رطوبت باقی‌مانده خاک $\left(\frac{cm^3}{cm^3}\right)$، k_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک $\left(\frac{cm}{min}\right)$، α، n و l پارامترهای شکل[2] هستند. مدل عددی HYDRUS-2D از روش اجزا محدود گالرکین برای حل معادلات مذکور استفاده می‌کند. Simunek *et al.*, (1999) روش حل معادلات را با جزئیات کامل تشریح کرده‌اند.

به‌منظور شبیه‌سازی پروفایل خاک یک محدوده مستطیل شکل به ابعاد ۱۲۰×۹۰ سانتی‌متر متناظر با ابعاد جعبه خاک به‌عنوان محدوده توزیع رطوبت با ۲۵۹۹ گره انتخاب شد. شدت جریان معرفی شده در مدل HYDRUS-2D در طول مدت زمان آبیاری در محل قرارگیری قطره‌چکان از رابطه زیر محاسبه شد (Simunek *et al.*, 2008):

(رابطه ۱۹)

$$q = \frac{Q}{L}$$

در این رابطه q شار مرزی جریان در محل قطره‌چکان (cm/hr)، Q دبی قطره‌چکان در واحد طول لترال (cm^2/hr) و L محیط دور قطره‌چکان (cm) می‌باشد.

شرایط اولیه و مرزی تعریف شده برای مدل HYDRUS-2D

شرایط اولیه براساس رطوبت اولیه خاک در مدل تعریف گردید. برای تعریف شرایط مرزی باتوجه به این‌که سطح جعبه خاک با پلاستیک پوشانده شده بود بنابراین تبخیر-تعرق در سطح بالایی پروفیل خاک صفر فرض شد و در محل قرارگیری قطره‌چکان به‌صورت جریان متغیر با زمان به مدل معرفی شد که در پایان هر چرخه آبیاری شرایط مرزی جریان در محل قطره‌چکان صفر لحاظ گردید. هم‌چنین دیواره‌های جعبه خاک در طول مدت انجام آزمایش بدون جریان و کف جعبه خاک یا پروفیل خاک به‌صورت زهکشی آزاد در مدل تعریف شد (شکل ۲).

پارامترهای هیدرولیکی خاک

در پژوهش حاضر برای تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک از مدل رزتا[3] (زیر برنامه‌ی مدل HYDRUS-2D) استفاده شد و سپس با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس مقادیر پارامترها بهینه گردید. مدل رزتا می‌تواند ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند پارامترهای معادله معلم-وان‌گنوختن را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با دقت قابل قبولی برآورد کند. نسخه فعلی آن شامل پنج مدل مختلف از نوع توابع انتقالی کلاسی و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد که پارامترهای هیدرولیکی خاک را براساس

1. Mualem-Van Genuchten
2. Shape factors
3. Rosetta

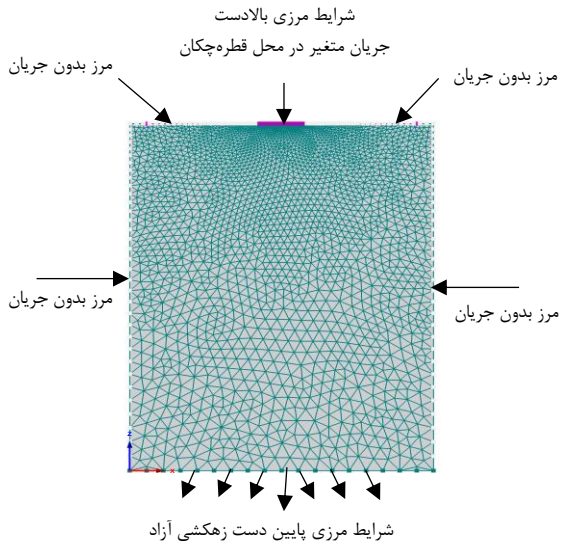
بافت خاک، درصد شن، رس و سیلت، چگالی ظاهری و حد ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم برآورد می‌کند.

واسنجی و صحت سنجی مدل HYDRUS-2D

عملیات واسنجی مدل HYDRUS-2D برای پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط بلوک‌های گچی که داخل جعبه خاک کار گذاشته شده بودند به روش مدل‌سازی معکوس انجام شد Hopmans and Bristow, (2002) برای انجام واسنجی از مقادیر تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک توسط مدل رزتا استفاده شد. مقادیر پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده مدل در جدول (۳) ارائه شده است. به‌منظور صحتسنجی مدل نتایج شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی با استفاده از مقادیر واسنجی شده پارامترهای هیدرولیکی توسط مدل با مقادیر ابعاد پیاز رطوبتی اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف انجام آزمایش مقایسه گردید.

جدول ۳- مقادیر واسنجی شده پارامترهای هیدرولیکی خاک

θ_r ($cm^3.cm^{-3}$)	θ_s($cm^3.cm^{-3}$)	$\propto$ (1/cm)	n	K_s (cm/hr)	l
۰/۰۶۱۴۸	۰/۴۴۵۶	۰/۰۱۲۳۴	۱/۲۴۳	۰/۴۳۸۱	۰/۵



شکل ۲. شمای شرایط مرزی تعریف شده در مدل عددی HYDRUS-2D

ارزیابی عملکرد مدل تجربی و عددی HYDRUS-2D

ازریابی عملکرد مدل‌های تجربی و عددی مورد استفاده در پژوهش حاضر در دو بخش انجام شد. در بخش اول به‌منظور مقایسه مقادیر برآوردی توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمون تی-استیودنت در سطح معنی‌داری ۵ درصد استفاده گردید. در بخش بعدی از معیارهای آماری متداول شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، شاخص کارایی مدل (EF) استفاده شد (Malek *et al.*, 2016):

(رابطه ۲۰)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}$$

(رابطه ۲۱)

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_i - O_i|$$

(رابطه ۲۲)

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}$$

در این روابط P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر مشاهده شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده شده و n تعداد داده هاست. یک مدل بهینه دارای کم‌ترین مقدار RMSE و MAE و بیش‌ترین مقدار EF می‌باشد.

نتایج و بحث

تعیین ضرایب مدل تجربی

به‌منظور تعیین ضرایب مدل تجربی، ابتدا مقادیر پارامترهای D^* و $\forall^*$ و W^* با استفاده از معادلات مربوطه و مقادیر اندازه‌گیری شده تیمارها در طی انجام آزمایش محاسبه گردید و سپس با رسم نمودار نمایی D^* و W^* در مقابل $\forall^*$ مقادیر ضرایب معادلات به‌دست آمد (شکل ۳).

با داشتن ضرایب a_1، b_1، a_2 و b_2 حاصل از شکل (۳) معادلات برآورد عمق و عرض پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی به‌شکل زیر به‌دست می‌آید:

(رابطه ۲۳)

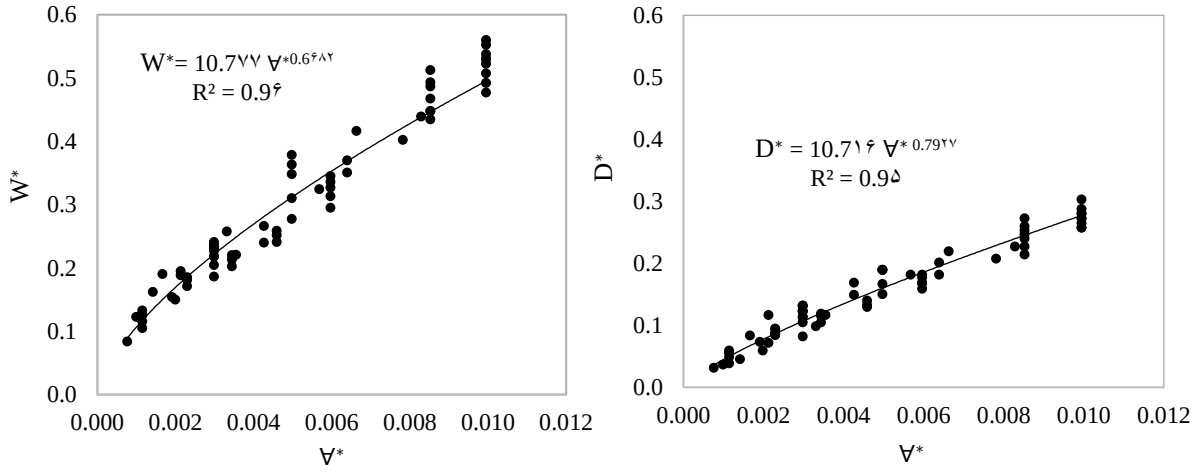
$$D = 10.716\ \forall^{0.7927}\ PR^{-0.2073}\left(\frac{K_s}{q}\right)^{0.6891}$$

(رابطه ۲۴)

$$W = 10.777\ \forall^{0.6682}\ PR^{-0.3318}\left(\frac{K_s}{q}\right)^{0.5023}$$

در این روابط K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (m/hr)، q دبی خروجی قطره‌چکان (m^3/hr)، PR نسبت جریان پالسی، $\forall$ حجم آب کاربردی (m^3) و D و W به‌ترتیب عمق و عرض خیس‌شدگی پیاز رطوبتی (m) می‌باشند. با استفاده از معادلات ارائه شده امکان برآورد عمق و عرض خیس‌شدگی پیاز رطوبتی براساس دبی خروجی از قطره‌چکان، حجم آب کاربردی، هدایت

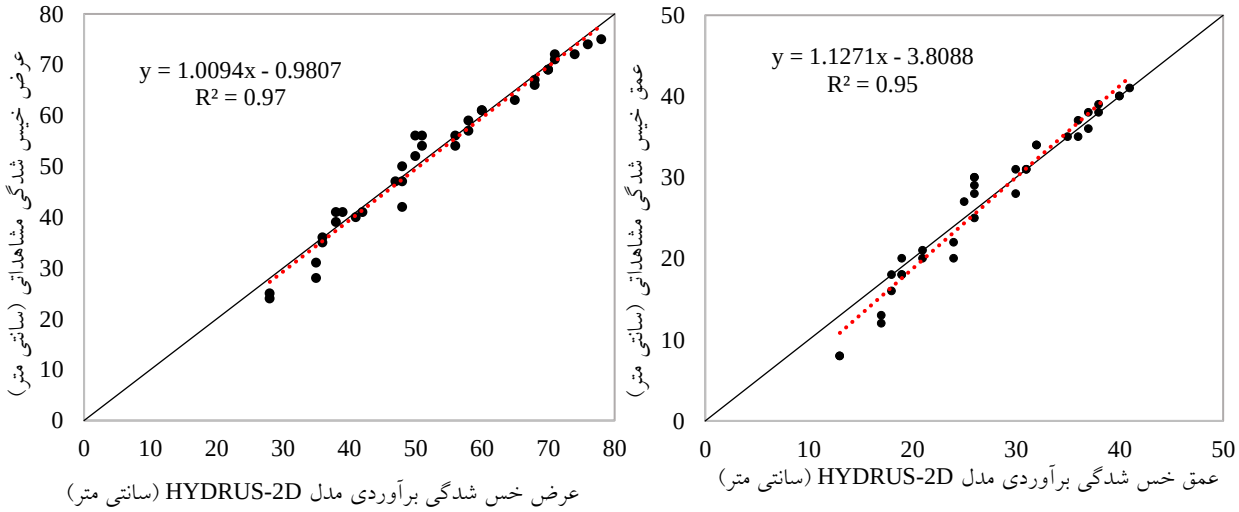
هیدرولیکی خاک و نسبت جریان پالسی وجود دارد.



شکل ۳. رابطه بین عمق و عرض خیس‌شدگی بدون بعد و حجم آب آبیاری بدون بعد

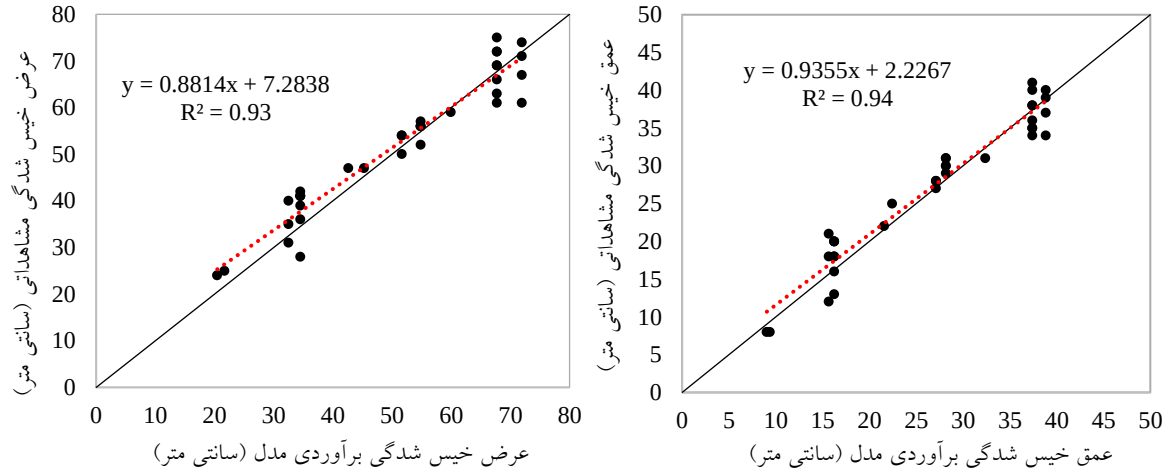
صحت‌سنجی مدل تجربی و عددی HYDRUS-2D

برای استخراج معادلات مربوط به مدل تجربی براساس روش آنالیز ابعادی از حدود ۷۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده گردید و برای ارزیابی معادلات تجربی به‌دست آمده از ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد. شکل (۴) مقایسه مقادیر عرض و عمق خیس‌شدگی پیاز رطوبتی برآوردی توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده عمق و عرض خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای پالسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد بین مقادیر برآوردی توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت خوبی با ضریب همبستگی بالا وجود دارد. انطباق خط رگرسیون بر خط (1:1) نیز نشان‌دهنده دقت مدل پیشنهادی تجربی در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی است.



شکل ۴. رابطه بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی عمق و عرض خیس‌شدگی پیاز رطوبتی توسط مدل تجربی ارائه شده در پژوهش حاضر

به‌منظور صحت‌سنجی مدل عددی HYDRUS-2D نیز مقادیر ابعاد پیاز رطوبتی شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۵). با توجه به انطباق خط رگرسیون بر خط (1:1) و بالا بودن ضریب همبستگی محاسباتی می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی HYDRUS-2D ابعاد پیاز رطوبتی اطراف قطره‌چکان در شرایط آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی را با دقت مناسبی برآورد می‌کند.



شکل ۵. رابطه بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی عمق و عرض خیس‌شدگی پیاز رطوبتی توسط مدل HYDRUS-2D

ارزیابی عملکرد مدل تجربی و عددی HYDRUS-2D

برای اطمینان بیش‌تر از ارزیابی مدل تجربی به‌دست آمده در این پژوهش و مدل عددی HYDRUS-2D علاوه بر نمودارهای ارائه شده در شکل (۴ و ۵) تفاوت بین مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده ابعاد پیاز رطوبتی با استفاده از آزمون تی-استیودنت در سطح معنی‌داری پنج درصد نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. طبق نتایج به‌دست آمده مقدار آماره t محاسباتی برای هر دو پارامتر عمق و عرض خیس‌شدگی برآورد شده توسط مدل تجربی و مدل عددی کم‌تر از مقدار آماره t بحرانی و هم‌چنین مقدار P-value نیز بیش‌تر از ۰/۰۵ می‌باشد و بیان‌گر این است که با احتمال ۹۹/۵ درصد تفاوت معنی‌داری بین مقادیر برآوردی توسط مدل تجربی و مدل عددی HYDRUS-2D و مقادیر اندازه‌گیری شده ابعاد پیاز رطوبتی وجود ندارد و دقت هر دو مدل برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی رضایت‌بخش می‌باشد.

جدول ۴- نتایج آنالیز آماری آزمون تی-استیودنت و پارامترهای آماری بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی ابعاد پیاز رطوبتی

مدل مورد استفاده	ابعاد پیاز رطوبتی	درجه آزادی	$t_{computed}$	$t_{critical}$	P (0.05)	RMSE (cm)	MAE (cm)	EF
مدل تجربی	عمق	۳۴	۱/۲۲	۱/۶۹	۰/۱۲	۲/۵	-۰/۵	۰/۹۷
	عرض	۳۴	۱/۶۵	۱/۶۹	۰/۰۵۳	۴/۵	-۱/۲	۰/۹۷
مدل عددی HYDRUS-2D	عمق	۳۴	-۰/۸	۱/۶۹	۰/۲۱۵	۲/۳	۰/۳۱	۰/۹۹
	عرض	۳۴	-۱/۰۶	۱/۶۹	۰/۱۵	۲/۷	۰/۴۹	۰/۹۹

مقدار آماره RMSE محاسبه شده برای عمق و عرض پیاز رطوبتی در مدل تجربی (۲/۵ و ۴/۵ سانتی‌متر) بیش‌تر از مقدار آن در مدل عددی HYDRUS-2D (۲/۳ و ۲/۷ سانتی‌متر) می‌باشد که بیان‌گر دقت بالاتر مدل عددی در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی است. مقدار آماره RMSE شاخصی از عملکرد مدل می‌باشد ولی میزان بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مدل را مشخص نمی‌کند. برای کمی‌سازی دقت مقادیر برآوردی مدل در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده ابعاد پیاز رطوبتی از آماره میانگین خطا (ME) استفاده شد. مقدار مثبت آماره ME نشان‌دهنده بیش‌برآورد و مقدار منفی آن نشان‌دهنده کم‌برآورد مدل تجربی می‌باشد. مقدار مطلق این آماره نیز نشان‌دهنده عملکرد مدل است. نتایج نشان داد که مدل تجربی پیشنهادی مقادیر ابعاد پیاز رطوبتی را کم‌برآورد و مدل عددی HYDRUS-2D بیش‌برآورد می‌کند. پارامتر کارایی مدل‌سازی نیز برای ارزیابی عملکرد مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد که باتوجه به نتایج به‌دست آمده مدل تجربی پیشنهادی در این پژوهش دارای کارایی ۹۷٪ و مدل عددی HYDRUS-2D دارای کارایی ۹۹٪ می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان از هر دو مدل تجربی و مدل عددی HYDRUS-2D برای برآورد عمق و عرض پیاز رطوبتی تحت سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی در خاک با بافت سنگین (رسی) با دقت قابل قبولی استفاده کرد. اگرچه نتایج حاکی از دقت بالاتر مدل عددی HYDRUS-2D در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی می‌باشد، اما باید درنظر داشت که استفاده از مدل عددی به‌لحاظ نیاز به داده‌های ورودی با جزئیات بیش‌تر زمان‌برتر از مدل تجربی

می‌باشد. پژوهشگران زیادی از جمله Zandi *et al.*, 2020; Mohammadbeygi *el al.*, 2017 و Mirzaee *et al.*, 2020 نیز در نتایج تحقیقاتشان عنوان داشتند که مدل‌های تجربی آنالیز ابعادی دارای دقت قابل قبولی در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در شرایط آبیاری قطره‌ای می‌باشند. Zandi *et al.*, 2020 مقدار آماره EF محاسباتی را برای شبیه‌سازی قطر پیاز رطوبتی در سه بافت خاک در محدوده ۸۵-۹۶ درصد و برای عمق خیس‌شدگی بالا و پایین قطره‌چکان در سه بافت خاک در محدوده ۸۱-۹۸/۴ درصد گزارش کردند. Eskandari Tadevani *et al.*, 2020 نیز گزارش کردند که ضریب تعیین داده‌های مدل عددی Hydrus-2D برای برآورد عمق و عرض پیاز رطوبتی در خاک لوم‌رسی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند به‌طوری که مقدار حداقل ضریب تعیین ۰/۹۲ به‌دست آمد. بنابراین نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج تحقیقات انجام شده پیشین مطابقت دارد. باتوجه به این‌که معادلات تجربی ارائه شده در این پژوهش تابعی از حجم آب آبیاری هستند، بنابراین در هر مدت زمانی از شروع آبیاری امکان برآورد عمق و عرض پیاز رطوبتی متناسب با دبی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی خاک و نسبت پالس مورد استفاده در سیستم آبیاری قطره‌ای فراهم می‌باشد.

نتیجه‌گیری

اگرچه مدل‌های عددی برآورد ابعاد پیاز رطوبتی انعطاف‌پذیری بیش‌تری برای شبیه‌سازی شرایط واقعی حاکم بر جریان دارند ولی استفاده از آن‌ها نیاز به اطلاعات جزئی درباره ویژگی‌های هیدرولیکی خاک دارد که باعث می‌گردد استفاده از آن‌ها زمان‌بر بوده و نیاز به محاسبات پیچیده‌تری داشته باشد. مزیت اصلی مدل‌های تجربی در مقایسه با مدل‌های عددی پارامترهای ورودی کم‌تر و سادگی کاربرد می‌باشد. مدل‌های تجربی ارائه شده برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در مطالعات قبلی محدود به رژیم جریان پیوسته می‌باشند و در شرایط مدیریت پالسی کاربردی ندارد. بنابراین در پژوهش حاضر مدل تجربی برای برآورد عمق و عرض پیاز رطوبتی تحت شرایط آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی ارائه گردید. برای توسعه مدل تجربی از روش آنالیز ابعادی استفاده شد که پارامترهای ورودی مدل شامل دبی‌قطره‌چکان، حجم آب کاربردی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به‌عنوان نماینده‌ای از وضعیت خاک منطقه و پارامتر نسبت پالسی برای لحاظ کردن مدیریت جریان پالسی می‌باشند. عملکرد مدل عددی HYDRUS-2D نیز برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی تحت آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج آزمون آماری تی‌استیودنت نشان داد که مقادیر برآوردی ابعاد پیاز رطوبتی توسط مدل تجربی و مدل عددی اختلاف معنی‌داری با مقادیر مشاهداتی ندارند. نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های تجربی و عددی مورد استفاده در پژوهش حاضر نشان داد که مقدار آماره RMSE در برآورد عمق و عرض پیاز رطوبتی توسط مدل تجربی ۲/۵ و ۴/۵ سانتی‌متر و توسط مدل عددی ۲/۳ و ۲/۷ سانتی‌متر می‌باشد. هم‌چنین بررسی مقادیر آماره EF نیز بیان‌گر کارایی مناسب مدل تجربی (۹۷٪) و مدل عددی (۹۹٪) بود. اگرچه نتایج نشان داد که دقت مدل عددی HYDRUYS-2D در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی بیش‌از مدل تجربی ارائه شده می‌باشد، اما باتوجه به سهولت کاربرد مدل تجربی ارائه شده در این پژوهش و نیاز به پارامترهای ورودی کم‌تر، استفاده از مدل تجربی توسعه یافته جهت برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در خاکی با بافت سنگین قابل توصیه می‌باشد. بنابراین در طراحی سیستم‌های آبیاری برای تعیین فاصله مناسب قطره‌چکان‌ها و لترال‌های آبیاری در شرایط مدیریت پالسی در خاکی با بافت سنگین می‌توان از مدل تجربی به‌دست آمده در پژوهش حاضر با دقت مناسبی استفاده کرد تا ضمن مطابقت بیش‌تر ابعاد پیاز رطوبتی با محدوده توسعه ریشه گیاه، راندمان سیستم و بهروری آب نیز افزایش یابد. پیشنهاد می‌شود به‌منظور افزایش دقت و عمومیت کاربرد مدل تجربی ارائه شده در این مطالعه که محدود به بافت‌های خاک سنگین و سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی می‌باشد، در پژوهش‌های آتی برای ارائه مدل تجربی برآورد ابعاد پیاز رطوبتی تحت سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی (سطحی و زیرسطحی)، آزمایش‌ها در بافت‌های خاک مختلف و عمق‌های نصب مختلف قطره‌چکان اجرا گردد.

سپاس‌گزاری

پژوهش حاضر با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (Iran National Science Foundation: INSF) انجام شده است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

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, September). DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In *7th International micro irrigation congress* (Vol. 1016).

Dasberg, S., and Or, D. (1999). Practical applications of

drip irrigation. In *Drip irrigation* (pp. 125-138). Springer, Berlin, Heidelberg.

Eskandari Tadavani, Z., Delghandi, M., Azhdari, K., Hosseini, S. H., & Dorostkar, V. (2020). Prediction of wetting patterns under surface drip irrigation using numerical and empirical models. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *14*(1), 321-330.

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-Abdeen, T. Z., Omara, A. A., and Abdel-Tawab, E. (2014). Modeling the soil wetting pattern under pulse and continuous drip irrigation. *American-Eurasian Journal Agricultural & Environment Science*, *14*(9), 913-922.

Kandelous MM, Liaghat A, Abbasi F (2008) Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. J Agri Sci 39(2):371–378 (in Persian).

Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. (2010a). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, *28*(5), 435-444.

Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. (2010b). 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.

Karimi, B., Sohrabi, T., Mirzaei, F., and Ababaei, B. (2015). Developing equations to predict the pattern of soils moisture redistribution in surface and subsurface drip irrigation systems using dimension analysis. *Journal of Water and Soil Conservation, 21(6),* 223-237.

Karimi, B., & Karimi, N. (2019). Simulation of the advance Velocity of the Wetting Front in pulse Drip Irrigation Systems by nonlinear regression model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *13*(5), 1374-1387.

Karmeli, D., and Peri, G. (1974). Basic principles of pulse irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *100*(3), 309-319.

Li, J., Zhang, J., and Rao, M. (2004). Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management*, *67*(2), 89-104.

Lubana, P. P. S., Narda, N. K., & Brown, L. C. (2004). Application of a hemispherical model to predict radius of wetted soil volume under point source emitters for trickle irrigated tomatoes in Punjab state, India. In *2004 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

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.

Mirzaee, F., Alkasir, Z., and Moini, A.R. (2020). Modeling for Estimating Soil Moisture Dimensions in Drip Irrigation in Layer Soil Using Dimensional Analysis Method. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 14(2),* 570-578.

Mohammadbeigi, A., Mirzaei, F., and Ashraf, N. (2017). Simulation of soil moisture distribution under drip irrigation pulsed and continuous in dimensional analysis method. *Journal of Water and Soil Conservation, 23(6),* 163-180.

Schwartzman, M., and Zur, B. (1986). Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *112*(3), 242-253.

Singh, D. K., Rajput, T. B. S., Sikarwar, H. S., Sahoo, R. N., and Ahmad, T. (2006). Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural water management*, *83*(1-2), 130-134.

Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, *31*(3), 225-258.

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.

Zandi, S., Boroomand Nasab, S., Ainechee, G. (2020). Estimating soil moisture pattern under subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(2), 626-636.