

Numerical and Empirical Simulation of Wetting Pattern in Subsurface Drip Irrigation in Clay Loam Soil

ZAHRA ESKANDARI TADAVANI^{1*}, KHALIL AZHDARI¹, MEHDI DELGHANDI¹, SAYYID HOSSEIN HOSSEINI¹,
VAJIHE DOROSTKAR¹

1. Department of Water and Soil, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
(Received: Apr. 1, 2019- Revised: Apr. 28, 2019- Accepted: May. 19, 2019)

ABSTRACT

Subsurface drip irrigation has been widely applied in arid area as a water-saving irrigation technology. But, a comprehensive knowledge of wetting pattern in drip Irrigation is essential for designing and managing such system. Simulation models have been proved to be useful method for this purpose. Therefore, this research was carried out to investigate the dimensions of wetting pattern in subsurface drip irrigation in a clay loam soil using invers modeling method with Hydrus 2D and based on experimental results and empirical models. The results were categorized into four sections: 1. Laboratory results showed that only for emitters with 8 liters per hour and installed at 15 cm depth, the wetted dimension below the emitter is more than the one above the emitter. 2. Sensitivity analysis on soil hydraulic parameters showed that the most sensitive parameter is θ_s , but the soil porosity continuity (l) and the remaining moisture content (θ_r) are not effective parameters. 3. Wetting front in emitters with discharge rate more than 2 liters per hour and installed at 15 cm depth in the clay loam soil is reached to the soil surface, while it does not reach to the soil surface in the emitters installed at 30 cm depth, even with discharge rate up to 8 liters per hour. Therefore, the evaporation rate from the soil surface is minimized. 4. Statistical indices showed that there is no significant differences among the empirical, numerical and the observation data, so that the normalized RMSE for the numerical and empirical models varied from 4.4 to 6.2 and 3.4 to 8 percent, respectively. Consequently, the results of this study showed that the proposed empirical model and Hydrus model can be used for estimation of wetting pattern in the soil.

Key words: Drip irrigation, Subsurface, Empirical model, Numerical model, Invers modeling.

شبیه‌سازی عددی و تجربی پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای خاک لومی رسی

زهرا اسکندری تادوانی^۱، خلیل ازدری^{۱*}، مهدی دلقدنی^۱، سید حسین حسینی^۱، وجیهه درستکاری^۱

۱. گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۱۲ = تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۲/۲۹)

چکیده

آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به طور گسترده‌ای در مناطق خشک به عنوان یک روش آبیاری کم مصرف مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما داشتن اطلاعات جامع از الگوی خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای برای طراحی و مدیریت این سیستم ضروری است. ثابت شده که مدل‌های شبیه‌سازی می‌توانند برای این منظور مفید باشند. بنابراین، این پژوهش به منظور بررسی ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در یک خاک لومی رسی به روش مدل‌سازی معکوس با مدل Hydrus 2D با تکیه بر نتایج آزمایشگاهی و توسعه مدل تجربی انجام شد. نتایج حاصل از پژوهش در چهار قسمت دسته‌بندی شدند: ۱- نتایج آزمایشگاهی نشان داد که فقط در آزمایش مربوط به قطره‌چکان‌های با دبی ۸ لیتر بر ساعت و عمق نصب ۱۵ سانتی‌متر، عمق خیس‌شدگی زیر قطره‌چکان بیشتر از ارتفاع خیس‌شدگی بالای قطره‌چکان می‌باشد. ۲- آنالیز حساسیت انجام یافته روی پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان داد که حساسترین پارامتر، رطوبت اشباع خاک (θ_s) بوده ولی پارامترهای پیوستگی منافذ خاک (l) و رطوبت باقی مانده (θ_r) در روند شبیه‌سازی پیاز رطوبتی بی‌تأثیر بودند. ۳- برای خاک مورد بررسی، چنانچه قطره‌چکان در عمق ۱۵ سانتی‌متری نصب شود در دبی‌های بیشتر از ۲ لیتر بر ساعت جبهه رطوبتی به سطح خاک رسیده و باعث مرطوب شدن سطح خاک می‌گردد، در حالی که در عمق استقرار ۳۰ سانتی‌متر، حتی با دبی ۸ لیتر بر ساعت جبهه رطوبتی به سطح خاک نمی‌رسد. بنابراین تلفات تبخیر از سطح خاک نیز به حداقل می‌رسد. ۴- شاخص‌های آماری نشان دادند تفاوت چندانی بین نتایج مدل‌های تجربی و عددی و مقادیر مشاهداتی وجود ندارد به طوری‌که RMSE نرمال شده برای مدل عددی و تجربی به ترتیب از ۴/۴ تا ۶/۲ و ۳/۴ تا ۸ درصد متغیر بود. بنابراین می‌توان از نتایج مدل تجربی پیشنهاد شده و مدل عددی Hydrus برای برآورد پیاز رطوبتی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، زیرسطحی، مدل تجربی، مدل عددی، مدل‌سازی معکوس.

مقدمه

کمبود آب و لزوم مصرف بهینه از آن در مناطق خشک و نیمه-خشک از جمله در ایران، دست‌اندرکاران امور آب و کشاورزی را به سمت استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری، مانند آبیاری قطره-ای سوق داده است. آبیاری قطره‌ای زیرسطحی روشی است که در آن قطره‌چکان‌ها در زیر سطح خاک قرار می‌گیرند و نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی مزیت‌هایی از جمله افزایش عمر قطره-چکان‌ها (به دلیل عدم قرار داشتن در معرض تابش آفتاب و صدمات مکانیکی)، کاهش میزان آب مصرفی (به دلیل خیس نشدن سطح خاک و در نتیجه کاهش قابل توجه تبخیر از سطح خاک)، افزایش عملکرد و کیفیت محصول، افزایش بهره‌وری مصرف آب، دسترسی بهتر ریشه به آب (به دلیل قرار گرفتن مستقیم آب در محیط ریشه و در نتیجه تسهیل جذب آب)، کاهش کاربرد آفت‌کش‌ها (به دلیل کاهش رشد علف‌های هرز ناشی از خیس نشدن سطح خاک) دارد (Elmaloglou and

Diamantopoulos., 2009). مهمترین ایراد این سیستم نیز احتمال ورود ریشه به داخل قطره‌چکان‌ها می‌باشد که می‌توان برای رفع این مشکل از قطره‌چکان‌های محافظ ریشه استفاده نمود. توزیع رطوبت در خاک به ویژه در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، به عواملی مانند ساختمان و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بستگی دارد (Singh et al., 2006). مطالعات اولیه توسط محققین نشان داد عمق استقرار لترال به صورت مشخص توزیع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در تعیین عمق مناسب نصب لترال باید به ساختمان خاک، بافت خاک و الگوی توزیع ریشه توجه کرد (Patel and Rajput, 2007). اطلاعات کافی از نحوه توزیع جریان آب در خاک به صورت افقی و عمودی در تعیین عمق نصب لوله‌های لترال، فاصله قطره‌چکان‌ها و چگونگی تنظیم شدت جریان خروجی از گسیلنده‌ها نقش مهمی دارد (Zhenjie et al., 2017). مدل‌های عددی، تحلیلی و تجربی زیادی برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده

نتایج مدل Hydrus-2D و آزمایشگاه مورد مقایسه قرار گرفت. قسمت شرقی استان سمنان یعنی محدوده شهرستان بسطام، از پتانسیل بالایی برای کشاورزی برخوردار می‌باشد و قسمت اعظم تولیدات کشاورزی منطقه شاهرود مربوط به این بخش می‌باشد که با توجه به کمبود منابع آب و همچنین سطح کشت بالای باغات و گلخانه در این منطقه، توسعه سامانه آبیاری قطره‌ای می‌تواند راهکار مناسبی برای غلبه بر کم‌آبی منطقه باشد. اما تاکنون مطالعه‌ای در زمینه‌ی الگوی خیس‌شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای برای خاک‌های منطقه صورت نگرفته است. بنابراین، این تحقیق با هدف تعیین الگوی خیس‌شدگی (پیاز رطوبتی) برای یک نوع خاک منطقه (خاک لومی‌رسی) صورت پذیرفت. از اهداف دیگر این تحقیق، بررسی کارایی مدل عددی Hydrus و مدل تجربی در برآورد الگوی خیس‌شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

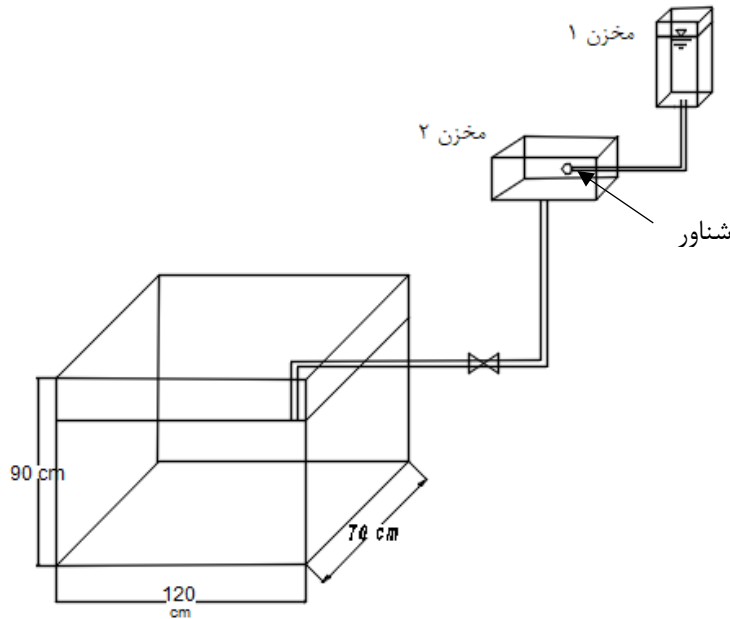
مدل فیزیکی: برای انجام آزمایش‌های این پژوهش یک مدل فیزیکی با ابعاد $90 \times 70 \times 120$ سانتی‌متر از جنس شیشه با چهارچوبی از نبشی‌های فلزی طراحی و ساخته شد (شکل ۱). در بخش تحتانی مدل خروجی‌هایی به عنوان زهکش تعبیه گردید. برای تأمین دبی قطره‌چکان به این صورت عمل گردید که مطابق شکل (۱) آب از مخزن مدرج شماره یک که دارای ابعاد 10×20 و ارتفاع 50 سانتی‌متر می‌باشد وارد مخزن شماره دو می‌شود. با تعبیه یک شناور در مخزن شماره دو ارتفاع آب در آن ثابت نگه داشته شد و شلنگ شفاف تأمین دبی که به مخزن شماره دو متصل می‌باشد به عنوان قطره‌چکان در نظر گرفته شد. روی این شلنگ یک شیر کوچک تعبیه گردید که با استفاده از آن میزان دبی خروجی از شلنگ تنظیم گردید. دبی خروجی، با استفاده از روش حجمی در سه تکرار اندازه‌گیری شد. در حین آزمایش نیز، میزان دبی خروجی، با اندازه‌گیری ارتفاع آب مخزن شماره یک کنترل گردید. برای این آزمایش، دبی‌های 2 ، 4 و 8 لیتر بر ساعت که دبی معمول قطره‌چکان‌ها می‌باشد مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که قطره‌چکان در گوشه مخزن (با فاصله 5 سانتی‌متری از دیواره‌ها) قرار گرفت دبی‌های مورد استفاده به $\frac{1}{4}$ تقلیل پیدا کردند. قطره‌چکان در 2 عمق 15 و 30 سانتی‌متر نصب شد.

مشخصات خاک: در این پژوهش از خاک مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود واقع در منطقه بسطام استفاده شد. به منظور جدا کردن سنگ و کلوخه و دست یافتن به خاک همگن و جلوگیری از ایجاد جریان ترجیحی، خاک از الک 2 میلی-متری عبور داده شد. مشخصات فیزیکی خاک محل تحقیق پس

شده است (Zhen *et al.*, 2016; Kandelous *et al.*, Chu, 1994; Singh *et al.*, 2010b; Shan *et al.*, 2019; Simunek *et al.*, 1999; al. (2006) مدل ارائه شده توسط شوارتزمن و زور (Schwartzman and Zur) را برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با منبع خطی، اصلاح نمودند و معادلات مربوط به عرض و عمق خیس‌شدگی را ارائه دادند. آنالیز آماری آنها نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی در سطح آماری 5 درصد وجود نداشته است و لذا می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی جبهه رطوبتی استفاده نمود. (Autovino *et al.* (2018) حجم خاک مرطوب شده را که تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک شنی لومی ایجاد شده، مورد مطالعه قرار دادند و حجم خاک مرطوب را به عنوان تابعی از زمان آبیاری، شرایط اولیه خاک و دبی قطره‌چکان ارائه نمودند. مقایسه میانگین پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که مدل Hydrus می‌تواند به عنوان ابزاری برای طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مورد استفاده قرار گیرد. تحقیقات محققان هم‌چنین نشان می‌دهد که برای مقدار ثابت رطوبت اولیه، ابعاد الگوی خیس شده با افزایش زمان آبیاری افزایش می‌یابد و برای یک دوره آبیاری ثابت، مقدار رطوبت اولیه بیشتر، باعث افزایش ابعاد الگوی رطوبتی می‌شود. (Kandelous and Simunek, Zhijuan *et al.*, et al., 2011; Besharat *et al.*, 2016; 2010a) (2018; Fatahi). همچنین (Al-Ogaidi *et al.* (2016) روی گیاه ذرت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی برای پیش‌بینی میزان تبخیر و تعرق و میزان محصول تولیدی تحقیق کردند و به این نتیجه رسیدند که براساس نتایج مدل Hydrus-2D برای سه نوع خاک لومی‌شنی، سیلتی و رسی لومی و دو دبی 2 و 4 لیتر در ساعت، پروفیل رطوبتی به خصوصیات هیدرولیکی خاک وابسته است و در مدت زمانی برابر با مدت آبیاری با کاهش دبی اما ثابت ماندن عمق و حجم آب کاربردی، حرکت عمودی و افقی پروفیل رطوبتی افزایش می‌یابد. (Kandelous and Šimunek (2010a) با استفاده از نرم افزار Hydrus توزیع آب اطراف قطره‌چکان را در یک خاک لومی‌رسی در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تناسب خوبی بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها وجود دارد. در پژوهشی که توسط Khalili *et al.* (2014) صورت گرفت از آنالیز ابعادی جهت برآورد ابعاد پیاز رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده شد. در این تحقیق عمق خیس‌شدگی در قالب عمق خیس‌شدگی در بالا و پایین قطره‌چکان مورد بررسی قرار گرفت و معادله عرض خیس‌شدگی با استفاده از مدل توسعه یافته شوارتزمن و زور به دست آمد و در نهایت، نتایج مدل تجربی با

خاک به صورت لایه لایه و در هر مرحله تا رسیدن به چگالی مورد نظر متراکم گردید. رطوبت وزنی خاک قبل از انجام آزمایش‌ها حدود ۷ درصد بود و برای جلوگیری از تغییر رطوبت، خاک داخل کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شد. این عمل به این دلیل صورت پذیرفت که رطوبت خاک قبل از شروع آبیاری (رطوبت اولیه) در همه نقاط خاک یکسان باشد.

از برداشت از محل و قبل از ریختن به مدل فیزیکی اندازه‌گیری شد و نتایج در جدول (۱) آمده است بافت خاک از نوع لومی‌رسی و مخلوطی از ۲۹/۷ درصد شن، ۳۸ درصد سیلت و ۳۲/۳ درصد رس بود. از آن جایی که تراکم خاک نقش بسیار مهمی را در حرکت آب در خاک و شکل پیاز رطوبتی دارد، لذا چگالی ظاهری خاک مزرعه باید مطابق نمونه آزمایشگاهی باشد. برای این منظور



شکل (۱). نمای شماتیک از مدل فیزیکی

جدول (۱) مشخصات فیزیکی خاک مورد تحقیق

| درصد رطوبت | | | | ρ_b (gr/cm^3) | بافت خاک | درصد ذرات | | |
|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------------------|-------------|-----------|------|------|
| θ_{Pwp} | θ_{FC} | θ_{Int} | θ_{Sat} | | | رس | سیلت | شن |
| ۱۲/۴ | ۲۳/۷ | ۷ | ۴۵/۸ | ۱/۵۴ | لوم رسی | ۳۲/۳ | ۳۸ | ۲۹/۷ |

مدل عددی: شبیه‌سازی عددی حرکت آب در خاک با استفاده از مدل Hydrus-2D انجام گرفت. معادله کلی حاکم بر جریان آب در یک محیط همگن و ایزوتروپ خاک، معادله ریچاردز است که به شرح زیر می‌باشد: (Richards, 1931)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right] \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این پژوهش برای تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، از رابطه ون‌گنوختن - معلم استفاده گردید (Van Genuchten, 1980)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۲})$$

آزمایش‌های انجام شده: در آزمایشگاه، خاک به مدت ۶ ساعت در معرض آبیاری قرار گرفت و با فاصله‌های زمانی یک ساعت، پروفیل جبهه رطوبتی به وسیله کاغذ شفاف کالک از دو طرف مخزن برداشت و میانگین‌گیری شد. پس از این مدت از یک سمت جداره در نقاط مختلف در قالب یک شبکه‌بندی مربعی با طول اضلاع ۵ و ۱۰ سانتی‌متر میزان رطوبت تعیین گردید. در نهایت برای اندازه‌گیری توزیع مجدد رطوبت بعد از ۲۴ و ۴۸ ساعت، از سمت دیگر جداره پروفیل رطوبتی خاک برداشت شد. برای آزمایش مربوط به دبی ۲ لیتر بر ساعت به دلیل کم بودن میزان تغییرات الگوی خیس‌شدگی در زمان توزیع مجدد، مدت زمان توزیع مجدد ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد.

عرض و عمق خیس شدگی از مدل رگرسیون چند متغیره خطی استفاده گردید یک مدل تجربی برای تخمین ابعاد پروفیل رطوبتی با در نظر گرفتن اثر دبی قطره چکان، زمان آبیاری، چگالی ظاهری، رطوبت اولیه، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، درصد شن و سیلت و رس خاک گسترش یافته است که معادلات آن به شرح زیر می باشد (Al-Ojaidi et al., 2016).

$$R_o = at^{a_1} q^{a_2} \rho_b^{a_3} \theta_i^{a_4} K_s^{a_5} S^{a_6} S_i^{a_7} C^{a_8} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$D = bt^{b_1} q^{b_2} \rho_b^{b_3} \theta_i^{b_4} K_s^{b_5} S^{b_6} S_i^{b_7} C^{b_8} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که R_o (cm) و D (cm) ابعاد پروفیل رطوبتی، t (min) زمان آبیاری، q (lit/hr) دبی قطره چکان، θ_i رطوبت اولیه، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، S درصد شن، S_i درصد سیلت و C درصد رس، a تا a_8 و b تا b_8 ضرایب تجربی می باشد. در پژوهش حاضر به دلیل وجود یک نوع بافت خاک، پارامترهای مربوط به ویژگی های خاک حذف شد. برای تعیین ضرایب این معادله ابتدا با استفاده از لگاریتم، رابطه به یک رابطه خطی تبدیل شد و با استفاده از نرم افزار SPSS ضرایب آن تعیین گردید.

ارزیابی مدل عددی و تجربی: برای ارزیابی مدل ها از

شاخص های آماری مختلفی استفاده می شود که در این پژوهش جهت مقایسه نتایج مدل عددی و تجربی با نتایج آزمایشگاهی از آماره های ضریب تبیین (R^2)، میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب باقیمانده (CRM) و نمودار یک به یک استفاده شد. شکل ریاضی این آماره ها به صورت معادلات (۸) تا (۱۱) می باشد:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} * 100 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آنها P_i مقادیر پیش بینی شده، O_i مقادیر اندازه گیری شده (مشاهده شده)، n تعداد نمونه های بکار رفته و \bar{O} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری نشان می دهد. NRMSE با نشان دادن مقدار خطا دقت مدل را مورد بررسی قرار می دهد. CRM منفی نشانگر تمایل مدل به برآورد بیش از مقادیر مشاهداتی است. چنانچه تمام مقادیر پیش بینی و اندازه گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی آماره های RMSE، CRM و NRMSE برابر صفر می شود (Mattar and Alamoud, 2017).

برای ترسیم نمودار یک به یک از رابطه $Y = \lambda X$ استفاده

$$k(h) = k_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^m \right)^m \right]^2 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در معادلات (۲ تا ۵)، θ مقدار رطوبت حجمی، h بار فشاری آب، t زمان، x مختصات افقی، z مختصات عمودی و k هدایت هیدرولیکی، $\theta(h)$ رطوبت غیر اشباع در مکش ماتریک h ، θ_s مقدار رطوبت اشباع، θ_r مقدار رطوبت باقی مانده، $k(h)$ هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در مکش ماتریک h ، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، S_e درجه اشباع موثر، l پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک (که در بیشتر پژوهش ها ۰/۵ در نظر گرفته می شود)، m و n و α پارامترهای شکل می باشند.

مدل Hydrus-2D برای حل معادله ریچاردز از روش عناصر محدود استفاده می کند. مش بندی مرزها در روش عناصر محدود، مستطیلی و فقط در لبه های جبهه رطوبتی به صورت مثلثی در نظر گرفته شد. دبی خروجی از قطره چکان تبدیل به شار جریان گردید و شبیه سازی ها مطابق با نمونه آزمایشگاهی برای سه شدت جریان ثابت ۱/۶، ۳/۲ و ۶/۴ سانتی متر بر ساعت انجام شد. شرط مرزی بالا (سطح خاک) مهم ترین قسمت در ورودی مدل می باشد که قطره چکان به صورت یک نیم دایره با شدت جریان ثابت فرض گردید.

آنالیز حساسیت: یکی از معایب اصلی مدل های شبیه-

سازی نیاز به داده های ورودی فراوان است (Walker, 2005). با توجه به هزینه و زمان بر بودن جمع آوری داده های ورودی، پی بردن به درجه اهمیت آن ها با توجه به هدف شبیه سازی امری ضروری است. تحلیل حساسیت به مطالعه تأثیر پذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی می پردازد (Wang et al., 2005). در این پژوهش حساسیت پارامترهای ون گنوختن روی ابعاد پیاز رطوبتی تحت آبیاری قطره ای زیر سطحی در یک خاک لومی رسی مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه حساسیت پارامترهای ورودی از رابطه پیشنهادی (Liu et al., 2007) استفاده شد.

$$S_x = \frac{\Delta O \Delta I^{-1}}{\bar{O}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که S_x ضریب حساسیت یک پارامتر ورودی مشخص روی یک خروجی معین، ΔO تغییرات پارامتر خروجی معین قبل و بعد از تغییر \bar{O} ، متوسط حسابی پارامتر خروجی، ΔI اختلاف پارامتر ورودی قبل و بعد از تغییر و \bar{I} متوسط حسابی پارامتر ورودی است. در این رابطه S_x معادل صفر نشان دهنده عدم حساسیت، از صفر تا ۰/۳ حساسیت کم، از ۰/۳ تا ۱/۵ حساسیت متوسط و بیشتر از ۱/۵ حساسیت زیاد می باشد.

مدل تجربی: در این پژوهش برای تعیین مدل تجربی

عمق خیس‌شدگی در بالا و پایین قطره‌چکان در طول مدت آزمایش دارای گسترش یکسان می‌باشد.

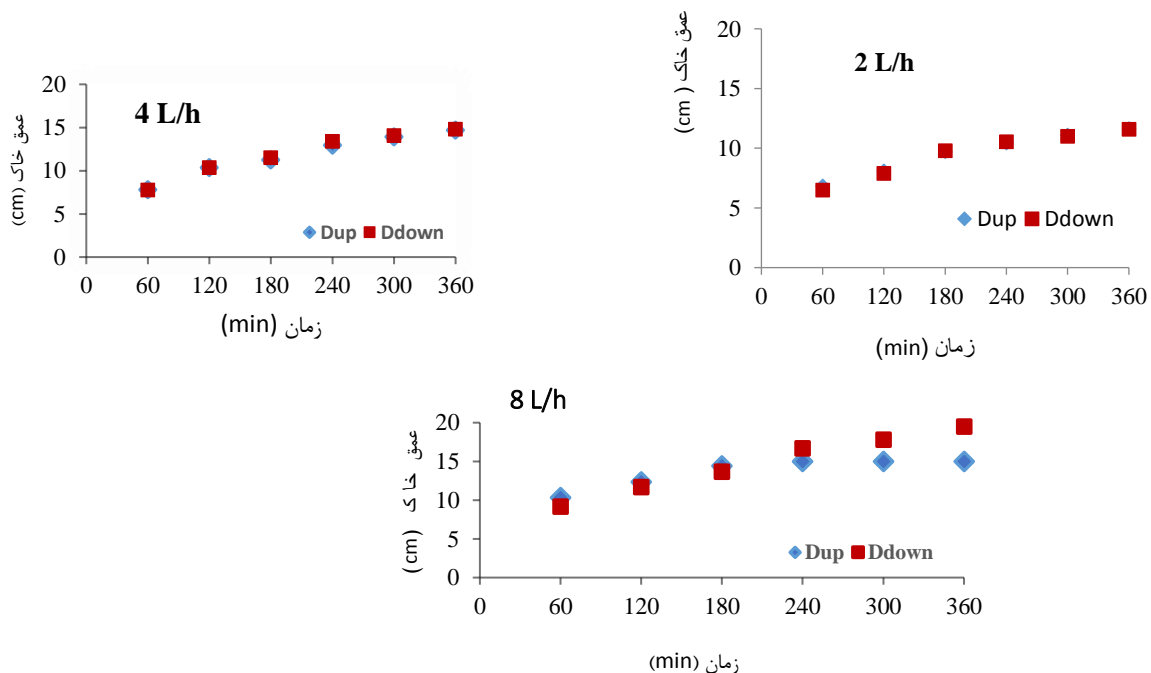
تعیین خطوط هم رطوبت: با توجه به داده‌های مشاهداتی رطوبت، می‌توان منحنی‌های هم رطوبت را برای دبی‌های مختلف در دو زمان پایان آزمایش و پایان توزیع مجدد ترسیم نمود. شکل‌های (۴، ۵ و ۶) خطوط هم رطوبت را برای دبی ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها مشخص می‌شود که در پایان آبیاری میزان رطوبت در محل قطره‌چکان به رطوبت اشباع ($\theta_{sat}=45/6\%$) نزدیک شده و با فاصله گرفتن از این نقطه میزان رطوبت کاهش یافته است. پس از قطع شدن جریان، میزان رطوبتی که در حدفاصل رطوبت در ظرفیت زراعی ($\theta_{FC}=23/7\%$) و رطوبت اشباع قرار دارد، تحت تاثیر نیروی ثقل از منطقه مرطوب خارج شده و تخلیه آب آزاد اتفاق می‌افتد که منجر به افزایش مساحت پیاز رطوبتی می‌گردد. پس از این مرحله میزان رطوبت در محل قطره‌چکان باید حداکثر مطابق رطوبت در ظرفیت زراعی باشد. اما در شکل‌های فوق ملاحظه می‌شود که میزان رطوبت پس از مدت توزیع مجدد بیشتر از رطوبت ظرفیت زراعی است. این بدین معنا است که خاک به زمان بیشتری برای توزیع مجدد احتیاج داشته است و با افزایش دبی مدت‌زمان لازم افزایش می‌یابد. همچنین در شکل‌های فوق ملاحظه می‌شود که در پایان آبیاری مساحت منطقه اشباع در محل قطره‌چکان متناسب با افزایش دبی افزایش می‌یابد.

می‌شود. که X و Y به ترتیب مقادیر حاصل از آزمایشگاه و مدل‌های مختلف و λ شیب بهترین خط برازش داده شده می‌باشد. $\lambda < 1$ نشان‌دهنده مقادیر کمتر Y نسبت به X و $\lambda > 1$ نشان‌دهنده مقادیر بیشتر Y نسبت به مقادیر X می‌باشد. خطای حاصل از برازش نمودار یک به یک را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود (Esfandiari and Maheshwari, 2001).

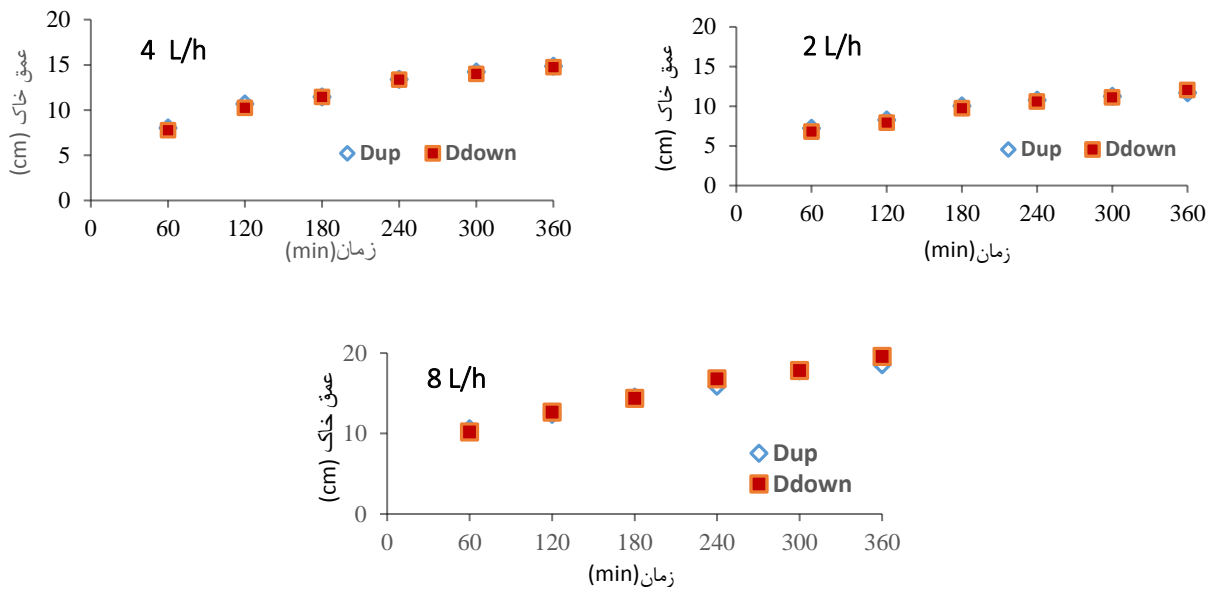
$$Er = |1 - \alpha|100 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

نتایج و بحث

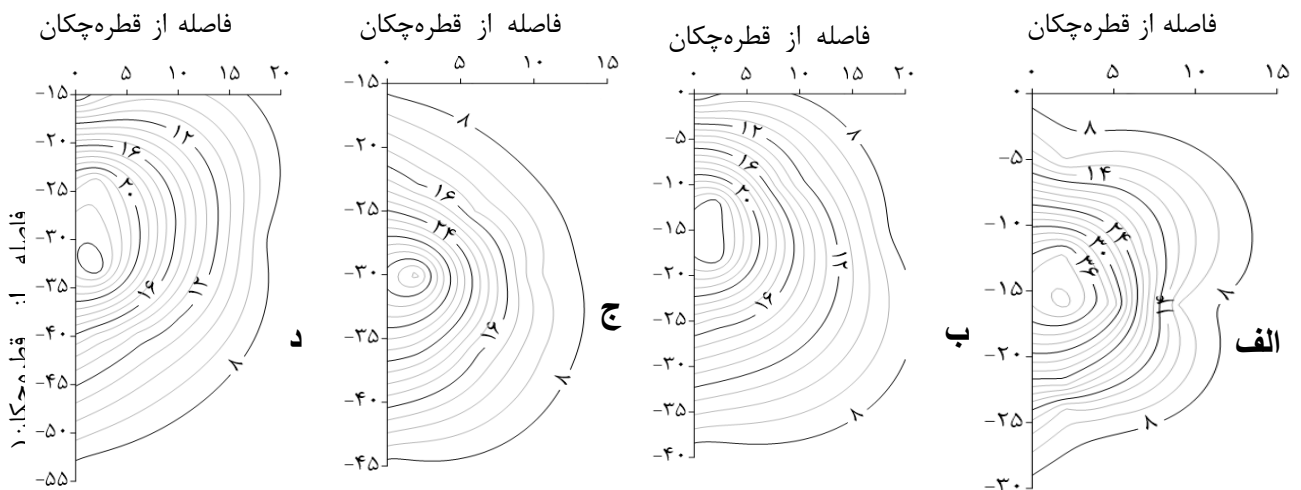
نتایج آزمایشگاهی: حداکثر عمق خیس‌شدگی در بالا و پایین قطره‌چکان برای هر سه دبی و دو عمق مختلف از روی منحنی‌های پیشروی آب در زمان‌های مختلف برداشت شد و در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه گردید. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که فقط در آزمایش مربوط به دبی ۸ لیتر بر ساعت در عمق نصب قطره‌چکان ۱۵ سانتی‌متر، عمق خیس‌شدگی زیر قطره‌چکان بیشتر از ارتفاع خیس‌شدگی بالای قطره‌چکان می‌باشد. بر اساس شکل (۲) در آزمایش ذکرشده دبی قطره‌چکان زیاد بوده و پیاز رطوبتی در زمان سوم به سطح خاک رسیده است و پس‌ازاین مدت ارتفاع خیس‌شدگی بالای قطره‌چکان ثابت می‌گردد ولی عمق خیس‌شدگی در زیر قطره‌چکان با گذشت زمان افزایش می‌یابد. شکل (۳) بیانگر این نکته است که با استقرار قطره‌چکان در عمق ۳۰ سانتیمتری با بکارگیری هر سه دبی ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت



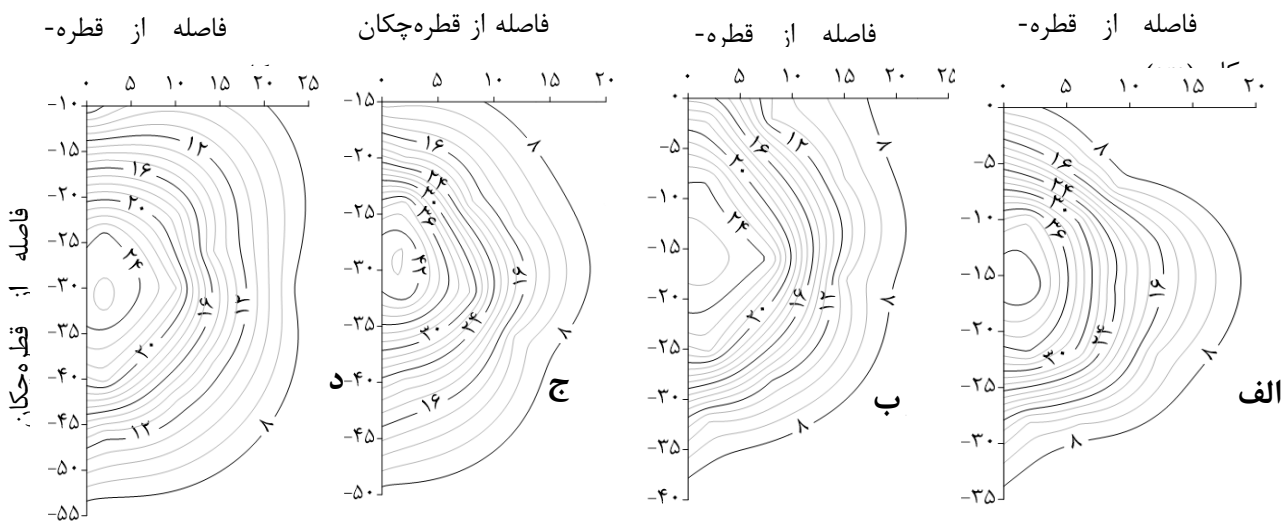
شکل ۲. مقادیر مشاهداتی حداکثر عمق خیس‌شدگی در بالا و پایین قطره‌چکان در مقابل زمان (عمق نصب قطره‌چکان ۱۵ سانتیمتر)



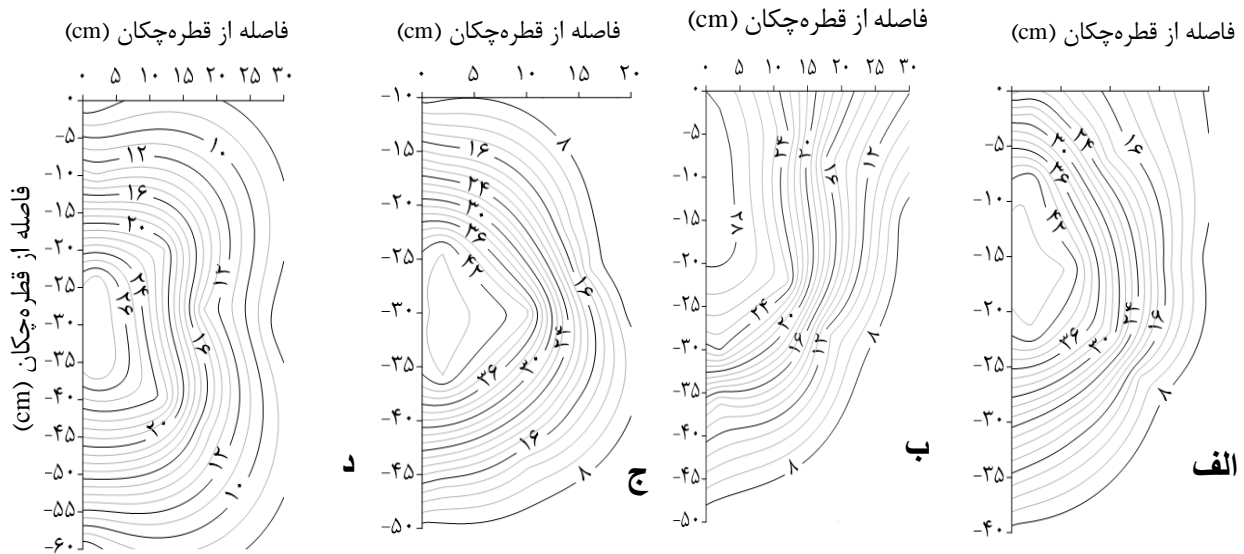
شکل (۳). مقادیر مشاهداتی حداکثر عمق خیس شدگی در بالا و پایین قطره چکان در مقابل زمان (عمق نصب قطره چکان ۳۰ سانتی متر)



شکل (۴) - خطوط هم رطوبت الف. و ج. در پایان آزمایش ب. و د. در پایان توزیع مجدد تحت دبی ۲ لیتر بر ساعت و عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی متر



شکل (۵) - خطوط هم رطوبت الف. و ج. در پایان آزمایش ب. و د. در پایان توزیع مجدد تحت دبی ۴ لیتر بر ساعت و عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی متر



شکل (۶) - خطوط هم رطوبت الف. و ج. در پایان آزمایش ب. و د. در پایان توزیع مجدد تحت دبی ۴ لیتر بر ساعتو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتیمتر

پياز رطوبتی (تحت یک شبکه‌بندی منظم) نمونه‌های رطوبتی برداشت شد همین عمل پس از پایان توزیع مجدد (۴۸ ساعت پس از آبیاری) نیز تکرار گردید. بنابراین با توجه به شش آزمایش انجام‌شده (۳ دبی و ۲ عمق کارگذاری قطره‌چکان) تعداد ۱۲ سری داده رطوبتی برداشت شد که از این مقدار نه سری برای واسنجی مدل عددی استفاده گردید و از طریق حل معکوس توسط مدل عددی، پارامترهای هیدرولیکی خاک محاسبه و میانگین‌گیری شد که نتیجه مربوط به آن در جدول (۳) ارائه شده است. سپس به‌منظور صحت‌سنجی مدل عددی، سه سری داده باقی‌مانده با استفاده از ضرایب به‌دست‌آمده اجرا و نتیجه حاصل با مقادیر مشاهداتی مقایسه گردید و نتایج برای سه پارامتر شعاع خیس‌شدگی، عمق خیس‌شدگی و توزیع رطوبت در جدول (۴) ارائه شده است. نمودار یک به‌یک مربوط به میزان رطوبت در شکل (۷) آمده است.

نتایج مدل عددی: در این بخش ابتدا با توجه به اهداف شبیه‌سازی حساسیت پارامترهای ورودی در تخمین ابعاد پياز رطوبتی برآورد گردید. با بررسی میزان تغییرات این خروجی‌ها با توجه به تغییر در پارامترهای ورودی، حساس‌ترین پارامترهای ورودی مدل Hydrus-2D به ترتیب اهمیت و با توجه به هدف شبیه‌سازی به دست آمدند (جدول ۲). همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود حساس‌ترین پارامتر خاک θ_s یا رطوبت اشباع خاک می‌باشد. پارامترهای n ، K_s و α در رده‌های بعدی اهمیت قرار می‌گیرند. پارامتر l و θ_r در واقع یک پارامتر بی‌تاثیر در روند شبیه‌سازی می‌باشند. بنابراین چهار پارامتر حساس در مدل سازی معکوس در نظر گرفته شد و برای پارامتر l و θ_r از مقادیر برآورد شده با مدل ROSSETA استفاده شد. در مرحله آزمایشگاهی پس از اتمام هر آزمایش از نقاط مختلف

جدول ۲- حساسیت (S_x) پارامترهای ورودی مدل Hydrus-2D به شبیه‌سازی پياز رطوبتی

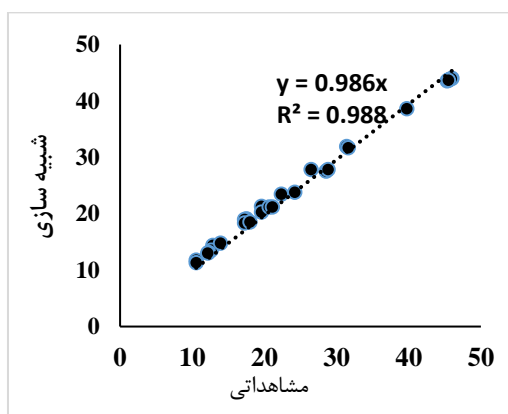
| پارامتر ورودی | درجه اهمیت | S_x | | |
|---------------|------------|----------|----------|----------|
| | | Dup | Ddown | Rmax |
| θ_r | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| θ_s | ۴ | ۰/۳۰۹۲۹۷ | ۰/۳۵۴۶۹۵ | ۰/۴۳۴۰۱۸ |
| α | ۲ | ۰/۰۶۱۱۷۶ | ۰/۰۶۸۳۵۵ | ۰/۱۰۶۰۱ |
| N | ۳ | ۰/۱۷۱۹۵۲ | ۰/۱۷۴۷۲۶ | ۰/۲۱۰۶۰۹ |
| Ks | ۲ | ۰/۰۵۴۳۹۵ | ۰/۱۰۰۹۶۳ | ۰/۱۳۲۰۶۷ |
| L | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |

جدول ۳- پارامترهای هیدرولیکی بر آورد شده مدل Hydrus-2D در مرحله واسنجی

| 1 | Ks[cm/hour] | N | α [1/cm] | θ_s | θ_r |
|-----|-------------|------|-----------------|------------|------------|
| ۰/۵ | ۰/۱۹۴ | ۱/۴۱ | ۰/۰۱۱۶ | ۰/۴۶ | ۰/۰۶ |

جدول ۴- شاخص‌های آماری در مرحله اعتبارسنجی

| پارامتر | R^2 | Er % | NRMSE % | CRM (نسبت) |
|---------------|-------|------|---------|------------|
| عمق خیس‌شدگی | ۰/۹۹ | ۴ | ۴/۴ | ۰/۰۳۷ |
| شعاع خیس‌شدگی | ۰/۹۹۲ | ۶ | ۶/۲ | ۰/۰۵۶ |
| رطوبت | ۰/۹۸۸ | ۱/۴ | ۴/۹ | ۰/۰۰۴ |



شکل (۷). نمودار یک‌به‌یک رطوبت

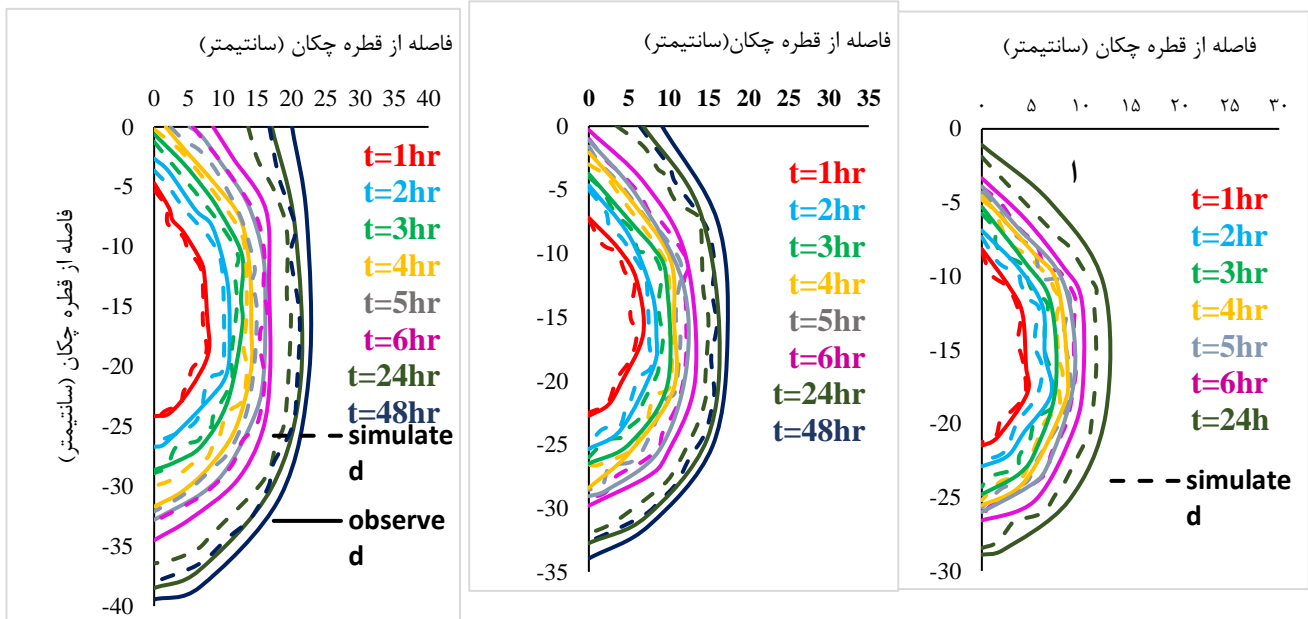
ملاحظه می‌شود که مدل عددی به خوبی جبهه رطوبتی را شبیه سازی می‌نماید. هرچند که در زمان‌های پایانی آزمایش و توزیع مجدد منحنی‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی در برخی نقاط بر هم منطبق نشده‌اند ولی خطای نسبی شبیه‌سازی با در نظر گرفتن گسترده شدن جبهه پیشروی تفاوت چندانی با زمان‌های ابتدایی آزمایش ندارد. مقایسه جبهه‌های رطوبتی در عمق‌های استقرار قطره‌چکان ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری نشان می‌دهد که در دبی ۲ لیتر در ساعت اختلاف زیادی میان جبهه رطوبتی در این دو عمق وجود ندارد (زیرا در این دبی حداکثر شعاع خیس‌شدگی کمتر از ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد بنابراین با توجه به ثابت بودن نوع خاک و دبی خروجی در هر دو عمق کارگذاری قطره‌چکان، ناپستی تفاوتی بین الگوی خیس‌شدگی این دو وجود داشته باشد). اما با افزایش دبی این اختلاف زیاد می‌شود. در عمق استقرار ۱۵ سانتی‌متری برای دبی ۴ لیتر در ساعت توزیع مجدد رطوبت و برای دبی ۸ لیتر در ساعت جبهه رطوبتی از ساعت سوم به بعد منطبق بر سطح خاک می‌شود. این امر موجب اختلاف میان عمق خیس‌شدگی در بالا و پایین قطره‌چکان و در نتیجه کاهش کل ارتفاع خیس‌شدگی در عمق استقرار ۳۰ سانتی‌متری می‌شود. لذا نکته حائز اهمیتی که در این پژوهش وجود دارد این است که با توجه به شکل (۸) برای یک خاک لومی‌رسی چنانچه قطره‌چکان

با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری مندرج در جدول (۳) مشخص می‌گردد که بر اساس ضریب تبیین، داده‌های مدل عددی تطابق بسیار بالایی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. به طوری که حداقل مقدار R^2 ، ۰/۹۸۸ به دست آمده است. علاوه بر این مقادیر Er و NRMSE نشان‌دهنده خطای پایین مدل در برآورد پارامترهای عمق و شعاع خیس‌شدگی و همچنین رطوبت می‌باشد. حداکثر خطای متوسط Er مربوط به شعاع خیس‌شدگی به مقدار تقریبی ۶ درصد و حداقل آن مربوط به رطوبت به مقدار ۱/۴ درصد می‌باشد. همچنین آماره CRM نیز نشان می‌دهد که مدل، مقادیر عمق خیس‌شدگی، شعاع خیس‌شدگی و رطوبت را کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد کرده است. اما اختلاف چندانی بین اعداد مشاهده شده و اعداد شبیه‌سازی شده وجود ندارد. در کل می‌توان گفت با توجه به آماره‌های ذکر شده در جدول (۳) نتایج مدل حاکی از تطابق عملکرد مدل با نتایج مشاهداتی می‌باشد.

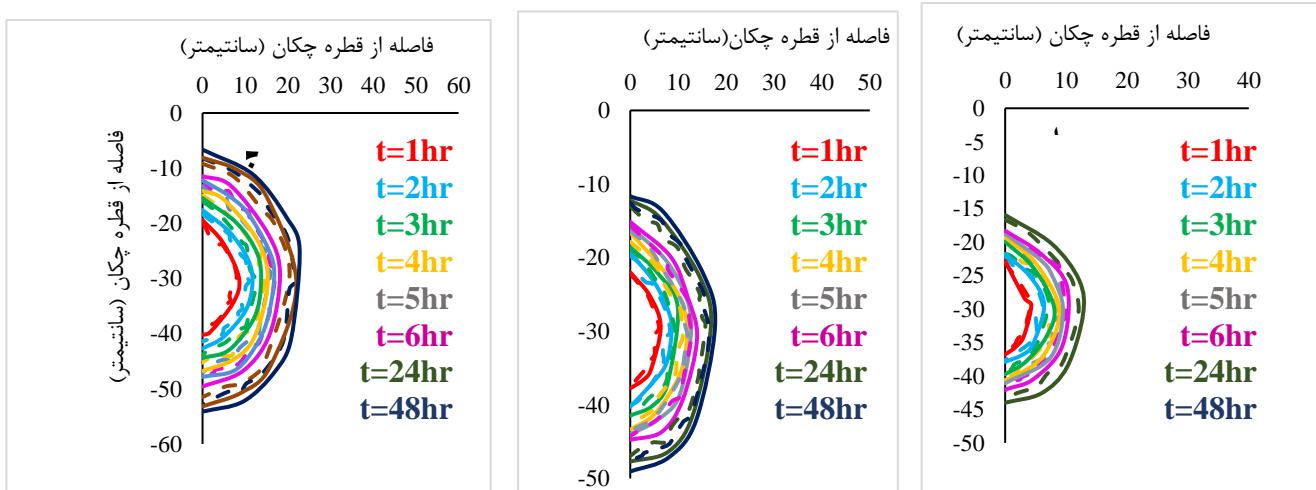
برای مقایسه بهتر نتایج حاصل از آزمایشگاه و مدل Hydrus، منحنی‌های پیشروی جبهه رطوبتی حاصل از مدل فیزیکی و مدل عددی در زمان‌های مختلف آبیاری برای هر سه دبی در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه شده است. با توجه به این شکل‌ها

توسعه ریشه بیشتر از ۶۰ سانتیمتر دانست (به شرطی که حجم آب خروجی از قطره چکان در هر آبیاری بیشتر از ۴۸ لیتر نباشد). در غیر این صورت گسترش پیاز رطوبتی بیشتر خواهد شد، زیرا از یک طرف آب خروجی از قطره چکان از محیط ریشه خارج نمی-شود و از طرف دیگر سطح خاک خیس نشده و در نتیجه تلفات تبخیر از سطح خاک به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

در عمق ۱۵ سانتیمتری نصب شود فقط با دبی ۲ لیتر بر ساعت جبهه رطوبتی در زیر سطح خاک گسترده می‌شود و با دبی‌های بیشتر از آن این گسترده‌گی در سطح خاک اتفاق می‌افتد در حالی که در عمق استقرار ۳۰ سانتیمتر، حتی با دبی ۸ لیتر بر ساعت هیچ نوع گسترش رطوبتی در سطح خاک مشاهده نمی‌شود و تلفات تبخیر از سطح خاک وجود نخواهد داشت. بنابراین می‌توان عمق نصب ۳۰ سانتیمتر را یک عمق مناسب برای گیاهان با



شکل ۸- جبهه رطوبتی حاصل از آزمایشگاه و مدل Hydrus تحت دبی الف- ۲ لیتر بر ساعت ب- ۴ لیتر بر ساعت ج- ۸ لیتر بر ساعت در زمان‌های مختلف (عمق نصب قطره چکان ۱۵ سانتی‌متر)



شکل ۹- جبهه رطوبتی حاصل از آزمایشگاه و مدل Hydrus تحت دبی الف- ۲ لیتر بر ساعت ب- ۴ لیتر بر ساعت ج- ۸ لیتر بر ساعت در زمان‌های مختلف (عمق نصب قطره چکان ۳۰ سانتی‌متر)

نتایج مدل تجربی: پس از تعیین ضرایب رگرسیون چندمتغیره توسط نرم‌افزار spss، معادله تجربی برای حداکثر عمق و عرض خیس‌شدگی به صورت زیر تعیین گردید.

(رابطه ۱۴)

$$R = 0.56 * (z^{0.048}) * (Q^{0.4}) * (\theta^{0.026}) * (t^{0.43})$$

(رابطه ۱۵)

$$D_{up} = 0.34 * (z^{0.056}) * (Q^{0.28}) * (\theta^{-0.03}) * (t^{0.3})$$

(رابطه ۱۶)

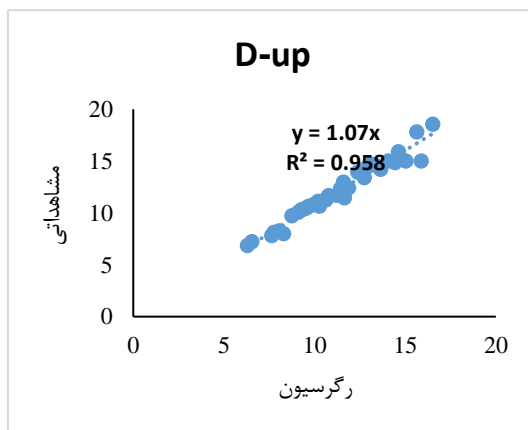
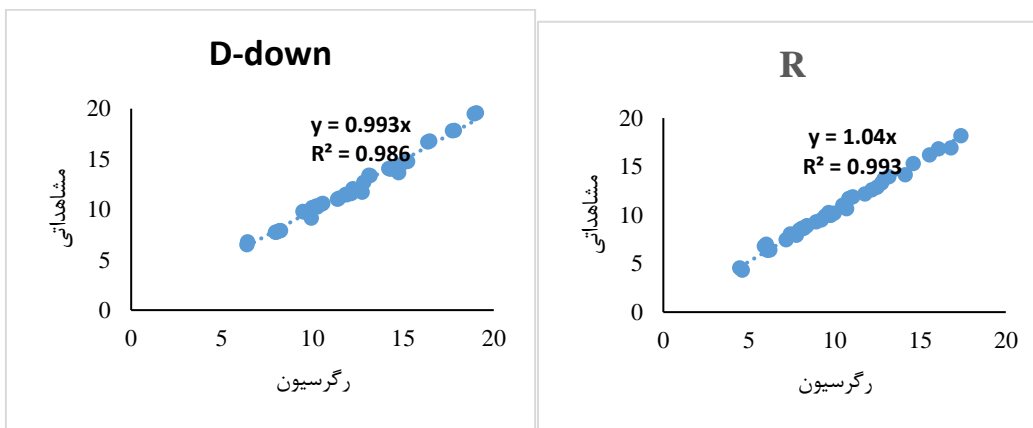
$D_{down} = 0.36 * (z^{0.009}) * (Q^{0.32}) * (\theta^{-0.042}) * (t^{0.36})$
 که R عرض خیس شدگی (m)، D_{UP} ارتفاع خیس شدگی در بالای قطره چکان (m)، D_{down} عمق خیس شدگی در زیر قطره-چکان (m)، z عمق استقرار قطره چکان (m)، Q دبی جریان ($\frac{m^3}{min}$)، θ رطوبت اولیه، t زمان آزمایش (min) می باشد. از آنجایی که رطوبت اولیه در همه آزمایش ها ۷ درصد بود برای افزایش دقت مدل تجربی و لحاظ نمودن رطوبت اولیه در معادلات تجربی، ابتدا مدل Hydrus با دو رطوبت اولیه ۱۰ درصد و ۱۵ درصد اجرا گردید و از نتایج مربوط به حداکثر عمق و شعاع خیس شدگی در معادلات تجربی استفاده شد.

برای ارزیابی نتایج مدل تجربی از داده های مشاهداتی در آزمایشگاه استفاده گردید. نتایج مربوط به ارزیابی مدل در جدول

(۵) ارائه شده است. جدول فوق نشان می دهد که مدل تجربی ارائه شده کارایی مناسبی در تخمین حداکثر عرض و عمق خیس-شدگی دارد به طوری که حداکثر مقدار خطای نسبی حدود ۷ درصد می باشد. بنابراین با اطمینان می توان از این معادله تجربی جهت برآورد عرض و عمق خیس شدگی برای یک خاک لومی رسی استفاده نمود. مدل تجربی نسبت به مدل عددی دارای این مزیت می باشد که در طراحی سامانه آبیاری قطره ای می توان به سادگی از نتایج آن استفاده نمود. هرچند در استخراج این معادله تجربی از داده های مدل عددی نیز برای افزایش دقت آن استفاده شد. شکل (۱۰) نمودارهای یک به یک مربوط به ارزیابی مدل های تجربی سه گانه را نشان می دهد همانطور که ملاحظه می گردد در کلیه مدل ها انطباق بسیار بالایی بین مقادیر مشاهداتی و رگرسیونی وجود دارد.

جدول (۵). شاخص های آماری برای ارزیابی مدل های تجربی

| پارامتر | R^2 | Er % | NRMSE % | CRM (نسبت) |
|-----------------|-------|------|---------|------------|
| ارتفاع خیس شدگی | ۰/۹۵۸ | ۷ | ۸ | ۰/۰۶۴ |
| عمق خیس شدگی | ۰/۹۸۶ | ۰/۷ | ۳/۴ | -۰/۰۰۹ |
| شعاع خیس شدگی | ۰/۹۹۳ | ۴ | ۵ | ۰/۰۴ |



شکل (۱۰). نمودارهای یک به یک مربوط به ارزیابی مدل های تجربی

نتیجه گیری

قطره چکان می باشد. این مطلب در پژوهش بشارت و مولایی توانی (۱۳۹۵) نیز آمده است. همچنین شبیه سازی های مدل عددی نشان داد بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و مقادیر مشاهده ای با ضریب تبیین ۰/۹۹ مطابقت چشمگیری وجود دارد. نتایج مربوط به برآورد پیاز رطوبتی خاک نشان داد که با نصب قطره-چکان در ۳۰ سانتیمتر زیرسطح خاک، رطوبت در سطح خاک گسترش نمی یابد. همچنین نتایج آماری نشان داد RMSE نرمال شده برای مدل عددی و تجربی به ترتیب از ۴/۴ تا ۶/۲ و ۳/۴ تا ۸ درصد متغیر بود. بنابراین می توان از نتایج مدل تجربی پیشنهاد شده و مدل عددی Hydrus برای برآورد پیاز رطوبتی استفاده نمود.

این پژوهش با بکارگیری مدل عددی Hydrus-2D/3D و توسعه مدل تجربی برای برآورد پیاز رطوبتی خاک در سیستم آبیاری قطره ای زیرسطحی در شرایط آزمایشگاهی در یک خاک لومی رسی با ۳ مقدار آبدهی قطره چکان و ۲ عمق نصب قطره چکان ۱۵ و ۳۰ سانتی متر زیر سطح خاک انجام شد. کریمی و همکاران (۱۳۹۲) نیز در این زمینه پژوهشی انجام داده اند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که فقط در آزمایش مربوط به دبی ۸ لیتر بر ساعت در عمق نصب قطره چکان ۱۵ سانتی متر، عمق خیس شدگی زیر قطره چکان بیشتر از ارتفاع خیس شدگی بالای

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.
- Autovino, D. Rallo, G. and Provenzano, G. (2018). Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under different irrigation systems with Hydrus-2D: Model performance and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, 203, 225-235.
- Besharat, S. and Mollae Tavana, S. (2016). Simulation of soil water profile in surface and subsurface drip irrigation systems by HYDRUS-2D. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2), 225-238.
- Chu, S.T. (1994). Green-Ampt analysis of wetting patterns for surface emitters. *ASCE J. Irrig. Drain. Engr.*, 120, 414-421.
- 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.
- Esfandiari, M. and Maheshvari, B.L. (2001). Field evaluation of surface irrigation models. *Agricultural Engineering Research*. 79(4):459-479.
- Fatahi Nafchi, R., Mosavi, F. and Parvanak, K. (2011). Experiential study shape and volume of wetted soil in trickle irrigation method. *African Journal of Agricultural Research*, 6 (2), 458-466.
- Kandelous, M. M. and Šimunek, 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 Simunek, 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. Mirzaei, F. and Sohrabi, T. (2013). Evaluation of Moisture Front Redistribution in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems. *Soil and Water science Journal*, 23(3), 183-192.
- Khalili, M. Akbari, M. Hezarjaribi, A. Zakerinia, M. and Abbasi, F. (2014). Numerical versus empirical models for estimating wetting patterns in subsurface drip irrigation systems. *J. Agri. Eng. Res*, 15(2), 1-14.
- Liu, H. F. Génard, M. Guichard, S. and Bertin, N. (2007). Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. *Journal of Experimental Botany*, 58(13), 3567-3580.
- Mattar, M. A., & Alamoud, A. I. (2017). Gene expression programming approach for modeling the hydraulic performance of labyrinth-channel emitters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 450-460.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1, 318_333.
- Patel, N. and Rajput, T. B. S. (2007). Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. *Agricultural water management*, 88(1), 209-223.
- Shan, G. Sun, Y. Zhou, H. Lammers, P. S. Grantz, D. A. Xue, X. and Wang, Z. (2019). A horizontal mobile dielectric sensor to assess dynamic soil water content and flows: Direct measurements under drip irrigation compared with HYDRUS-2D model simulation. *Biosystems Engineering*, 179, 13-21
- 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, Intl. *Ground Water Modeling Center, School of Mines, Colorado*.
- 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.
- Van Genuchten MT (1980). A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J*, 44, 892-898

- Walker, W. R. (2005). Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(2), 129-136.
- Wang, X. Youssef, M. A. Skaggs, R. W. Atwood, J. D. and Frankenberger, J. R. (2005). Sensitivity analyses of the nitrogen simulation model, DRAINMOD-N II. *Transactions of the ASAE*, 48(6), 2205-2212.
- Zhenjie, Q. Jiusheng L. and Weixia Z. (2017). Effects of lateral depth and irrigation level on nitrate and Escherichia coli leaching in the North China Plain for subsurface drip irrigation applying sewage effluent. *Irrigation Science*, 35(6), 469-482.
- Zhen, W. Jiusheng, L. and Yanfeng, L. (2016). Assessing the Effects of Drip Irrigation System Uniformity and Spatial Variability in Soil on Nitrate Leaching through Simulation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 59(1), 279-290.
- Zhijuan, Q. Hao, F. Ying, Z. Tibin, Zh. Aizheng, Y. and Zhongxue, Zh. (2018). Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China. *Agricultural Water Management*, 201, 219-231.