

## برآورد ابعاد پیاز رطوبتی با مدل تجربی و مدل عددی HYDRUS-2D در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

مژده خلیلی<sup>\*</sup>، مهدی اکبری، ابوظالب هزارجریبی، مهدی ذاکری‌نیا و فریبرز عباسی<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> نگارنده مسئول: نشانی: گرگان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، پیام‌نگار: mozhdeh733@gmail.com

<sup>\*\*</sup> به‌ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ و استاد موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی  
تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۱۸

### چکیده

کاهش چشم‌گیر کمیت و کیفیت منابع آب در دسترس، بشر را وامی‌دارد تا آب را به شکلی درست‌تر مصرف کند. سیستم‌های نوین آبیاری مانند آبیاری زیرسطحی، از راه‌هایی هستند که باعث افزایش بازده و کارایی مصرف آب می‌شوند. در این روش‌های آبیاری، با توزیع آب در داخل نیم‌رخ خاک، سطح خاک خشک باقی می‌ماند و تبخیر کاهش می‌یابد. در طراحی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، شکل و ابعاد پیاز رطوبتی عامل اصلی در تعیین عمق نصب لوله‌های قطره‌چکان‌دار و فاصله قطره‌چکان‌ها از یکدیگر است و به این منظور مدل‌های زیادی ارائه شده که با داشتن مشخصات هیدرولیکی خاک، دبی خروجی و حجم آب خارج شده، می‌توانند تخمین قابل قبولی از شکل پیاز رطوبتی ارائه دهند. در این تحقیق، برای برآورد پیاز رطوبتی از روش آنالیز ابعادی، به دلیل ساده بودن و نیز کم بودن تعداد پارامترهای موردنیاز، به‌عنوان مدل تجربی و مدل عددی HYDRUS-2D استفاده شد. مقادیر اندازه‌گیری شده، شکل پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (شامل عمق خیس شده در پایین قطره‌چکان، عمق خیس شده در بالای قطره‌چکان و عرض خیس شده) در یک خاک لومی با عمق نصب ۴۰ سانتی‌متر زیر سطح خاک با دبی ۳/۵ لیتر در ساعت با نتایج هر دو مدل مقایسه شد. ضریب تبیین بالای بین ۰/۸۸ تا ۰/۹۷ برای مدل HYDRUS-2D و ۰/۹۴ تا ۰/۹۸ برای مدل تجربی به دست آمد که دقت هر دو مدل را در تعیین ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نشان می‌دهد.

### واژه‌های کلیدی

آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، خاک لومی، عرض خیس‌شدگی، عمق خیس‌شدگی

### مقدمه

لوله‌های قطره‌چکان‌دار در زیر سطح خاک قرار می‌گیرند و نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی مزیت‌هایی دارد از جمله: افزایش عمر قطره‌چکان‌ها، کمتر شدن شدت جریان قابل استفاده، کاهش میزان آب مصرفی به دلیل کاهش تبخیر در فشار اسمزی پایین‌تر، افزایش رشد محصول، بالا رفتن عملکرد، بهتر شدن کیفیت محصول، افزایش

کمبود آب و لزوم مصرف بهینه از آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله در کشور ما، دست‌اندرکاران امور آب و کشاورزی را به سمت استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری، مانند آبیاری قطره‌ای، سوق داده است. آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از روش‌هایی است که در آن

عمق نصب قطره‌چکان‌ها ۳۰ سانتی‌متر زیر سطح خاک ارائه داده بودند. توسعه داده شد؛ نتایج نشان داد که بین مقادیر اندازه‌گیری شده و خروجی مدل نیمه‌تجربی همبستگی خوبی ( $R^2$  برابر ۹۷ درصد، ۹۹ درصد و ۹۷ درصد به ترتیب برای عرض خیس شده، عمق خیس شده در پایین قطره‌چکان و عمق خیس شده در بالای قطره‌چکان) وجود دارد (M-Kandelous *et al.*, 2008).

میرزایی و همکاران (Mirzaei *et al.*, 2006) با دخالت عوامل فیزیکی مؤثر بر حجم خاک مرطوب شده در زیر منبع تغذیه خطی و با استفاده از قضیه  $\pi$  باکینگهام و آنالیز ابعادی، روابطی نیمه‌تجربی ارائه دادند و اعلام کردند که نتایج برآورد شده همخوانی بسیار خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های توانمند در شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک است که بر پایه حل عددی معادله ریچاردز بسط داده شده است. این مدل برای هر سامانه آبیاری، از جمله آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، کاربرد دارد. کریمی‌گوغری و همکاران (Karimi Gogheri *et al.*, 2011) می‌گویند برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر در خاک شنی با حداکثر خطای ۰/۰۱۹۲، به ازای ۲۴ ساعت بعد از اتمام آبیاری، مدل HYDRUS-2D با ضریب تبیین ۰/۹۲ شبیه‌سازی قابل قبولی را دارد. این محققان گزارش می‌دهند که افزایش بده به ازای یک حجم ثابت آب آبیاری نه تنها باعث افزایش رطوبت نمی‌شود، بلکه باعث کاهش ابعاد ناحیه رطوبتی و در نتیجه کاهش فاصله لوله‌های آبد و بالا رفتن هزینه نصب سامانه می‌شود.

مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی حجم مرطوب شده خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مقیاس یک قطره‌چکان در خاک لوم رسی مناسب است و نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد (Provenzano, 2007, 2008). المالگلو و دیامنتوپولوز (Elmaloglou & Diamantopoulos, 2009) روی گیاه ذرت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و

بهره‌وری مصرف آب، افزایش راندمان توزیع آب با توزیع رطوبت در داخل خاک، کاهش خطر شوری برای گیاهان، تعدیل کاربرد کود شیمیایی، امکان استفاده بیشتر از آب‌های با کیفیت کمتر، تسهیل در عملیات کشاورزی، حفظ ساختمان خاک و حفاظت بیشتر از محیط‌زیست (Lamm & Camp, 2007; Elmaloglou & Diamantopoulos, 2009). طراحی درست این سامانه‌ها نیاز به اطلاعات کافی از نحوه توزیع جریان آب در خاک به صورت افقی و عمودی دارد. این نوع اطلاعات در تعیین عمق نصب لوله‌های آبد، فاصله قطره‌چکان‌ها، قطر روزنه قطره‌چکان‌ها و چگونگی تنظیم شدت جریان خروجی از گسیلنده‌ها نقش مهمی دارند (Acar *et al.*, 2009). از مدل‌های عددی، تحلیلی و تجربی زیادی برای شبیه‌سازی الگوی توزیع رطوبت برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده قرار می‌شود، از جمله مدل‌هایی که شوارتزمن و زور (Schwartzman & Zur, 1986)، چو (Chu, 1994)، بن-آشر و فنه (Ben-Asher & Phene, 1996) و سیمونک و همکاران (Simunek *et al.*, 1999, 2006) ارائه کرده‌اند. مدلی که شوارتزمن و زور (Schwartzman & Zur, 1986) برای آبیاری قطره‌ای ارائه داده‌اند با آنالیز ابعادی برای تعیین دو پارامتر D و W (به ترتیب عرض و عمق خیس شده) توسعه داده شد. مقادیر عمق و عرض خیس‌شدگی با داده‌های حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای در یک خاک لوم شنی، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۷ ساعت پس از کاربرد آب، با استفاده از لوله‌های متخلخل و نوار تیپ مقایسه شدند؛ این لوله‌ها و نوار در اعماق ۵-۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر زیر سطح خاک نصب شده بودند. در این تحقیق بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (Singh *et al.*, 2006).

برای تعیین ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به کمک آنالیز ابعادی، مدلی را که سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2006) در یک خاک لوم رسی با

گرفتند از سه حالت تحت شرايط مزرعه‌اي و عددي بهره بردند، اين سه حالت از اين قرارند: (قطره‌چکان‌ها به صورت ۱- یک منبع نقطه‌اي در حالت متقارن محوري دو بعدي، ۲- یک منبع خطي در حالت پروفيل دو بعدي و ۳- یک منبع نقطه‌اي با جريان کاملاً سه بعدي. اين محققان پس از آن عنوان کردند که از حالت متقارن محوري دو بعدي تنها زماني مي‌توان سود برد که پروفيل‌هاي رطوبتي هر یک از قطره‌چکان‌ها هنوز به هم نرسیده باشند و از حالت منبع خطي در حالت پروفيل دو بعدي زماني مي‌توان استفاده کرد که پروفيل‌هاي رطوبتي آن‌ها کاملاً با هم ترکيب شوند؛ ولي حالت سه بعدي براي تمامی لحظات توزيع رطوبت مورد استفاده قرار مي‌گيرد.

تحقيقات فوق توانايي نرم‌افزار HYDRUS-2D را در پيش‌بيني و شبیه‌سازي جبهه رطوبتي در آبياري قطره‌اي (سطحي و زيرسطحي) نشان مي‌دهد. از اين رو اهداف اين تحقيق به ترتيب عبارت است از: تفکيک پارامتر عمق خيس شدگي  $D$  به دو پارامتر  $Z_+$ ،  $Z_-$  (به ترتيب عمق خيس شده در پايين قطره‌چکان و عمق خيس شده در بالاي قطره‌چکان)، تعيين ضرائب توابع حاصل از آناليز ابعادي ارائه شده توسط ملايي‌کندلوس و همکاران (M-Kandelous *et al.*, 2008) با استفاده از داده‌هاي اندازه‌گيري شده در یک مدل فزيکي و آريزايي صحت مدل براي برآورد ابعاد پياز رطوبتي در آبياري قطره‌اي زيرسطحي با استفاده از آناليز ابعادي و مقايسه با نتايج حاصل از مدل عددي HYDRUS-2D در یک خاک لومي.

### مواد و روش‌ها

#### مشاهدات آزمايشگاهي

اين پژوهش در تابستان سال ۱۳۹۰ در مؤسسه تحقيقات فني و مهندسي کشاورزي (کرج) اجراء شد. بدین منظور یک مدل فزيکي شامل یک جعبه با ديواره‌هاي شفاف پلکسي گلاس به ابعاد ۱/۸، ۰/۹ و ۱ متر

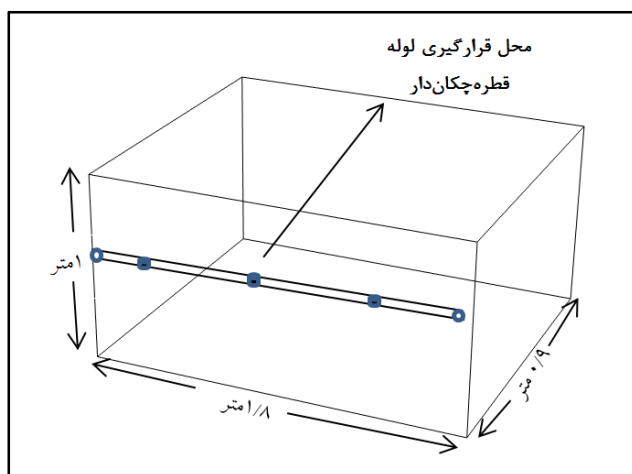
زيرسطحي براي پيش‌بيني ميزان تبخير و تعرق و ميزان محصول توليدي تحقيق کردند و به اين نتيجه رسيدند که بر اساس نتايج مدل HYDRUS-2D براي سه نوع خاک (لومي شني، سيلتي، رسي لومي) و دو دبي (۲ و ۴ ليتر در ساعت)، پروفيل رطوبتي به خصوصيات هيدروليکي خاک وابسته است و در مدت زماني برابر با مدت آبياري با کاهش دبي اما ثابت ماندن عمق و حجم آب کاربردي، حرکت عمودي و افقي پروفيل رطوبتي افزايش مي‌يابد. مدل HYDRUS-2D مقدار تبخير و تعرق را کمتر از مقدار واقعي برآورد مي‌کند (Mailhol *et al.*, 2011).

پاتل نيلام و راجپوت (Patel Neelam & Rajput, 2008)

نيز پياز رطوبتي و نحوه حرکت آب را در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری نسبت به محل استقرار قطره‌چکان‌ها در آبياري زيرسطحي بررسي و با مقايسه نتايج حاصل از شبیه‌سازي با نتايج مزرعه‌اي مشاهده کردند که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. ملايي‌کندلوس و سيميونک (M-Kandelous & Simunek 2010a, b) دو آزمايش تحت شرايط مزرعه و آزمايشگاهي با هدف آريزايي مدل HYDRUS-2D براي شبیه‌سازي حرکت آب در یک سيستم قطره‌اي زيرسطحي در خاک رسي لومي اجراء کردند و نتيجه گرفتند که اين مدل دقت بالايي دارد و در طراحي‌هاي آبياري قطره‌اي زيرسطحي مي‌توان از آن به‌عنوان ابزاري براي بهينه کردن فاکتورهاي اصلي استفاده کرد. نتايج حاصل از مدل ارائه شده توسط ملايي‌کندلوس و همکاران (M-Kandelous *et al.*, 2008) با نتايج حاصل از HYDRUS-2D و Wet Up مقايسه شدند و مقدار خطاي مطلقي برابر ۰/۸۷ تا ۱۰/۴۳، ۱ تا ۱۰/۴۳ و ۱/۳۴ تا ۱۲/۲۴ سانتی‌متر به ترتيب براي مدل HYDRUS-2D و Wet Up براي عمق خيس شدگي رو به پايين و رو به بالا و عرض خيس شدگي نشان داده شد. ملايي‌کندلوس و همکاران (M-Kandelous *et al.*, 2011) براي آريزايي توزيع رطوبت بين دو قطره‌چکان که مجاور هم قرار

حوضچه مکش، برای تعیین حجم آب مصرفی از کنتورهای حجمی و برای اندازه‌گیری رطوبت از پروفیل پروب استفاده شد. در این آزمایش سه نوبت آبیاری صورت گرفت، آبیاری اول برای نشست خاک انجام گرفت و هیچ‌گونه اندازه‌گیری در آن صورت نگرفت اما از نتایج دو آزمایش بعدی، با دبی ۳/۵ لیتر در ساعت برای هر قطره‌چکان به مدت ۴ ساعت، استفاده شد. در هر آبیاری جبهه رطوبتی در بازه‌های زمانی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳/۵ ساعته روی دیواره شفاف جعبه با مازیک رسم و بدین ترتیب ابعاد جبهه رطوبتی ( $w$  و  $Z_+$ ,  $Z_-$ ) اندازه‌گیری شد. از نتایج آزمایش دوم جهت واسنجی مدل HYDRUS-2D استفاده گردید. به این ترتیب که مقادیر رطوبت به دست آمده در آزمایشگاه با مقادیر حاصل از مدل مورد مقایسه قرار گرفت. از نتایج حاصل از آبیاری سوم نیز برای صحت‌سنجی دو مدل عددی و تجربی استفاده شد.

(به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) ساخته و با خاک لوم پر شد. مقداری خاک برای تعیین مشخصات فیزیکی آن به آزمایشگاه منتقل و با روش هیدرومتری درصد شن و سیلت و رس آن مشخص شد. بعد از پر کردن مدل فیزیکی (شکل ۱) از خاک در چندین عمق با استفاده از نمونه‌بردار خاک با قطر داخلی ۳ سانتی‌متر چگالی ظاهری تعیین گردید و مقدار متوسط ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای تبدیل درصد رطوبت وزنی به درصد رطوبت حجمی استفاده شد. برای تعیین درصد رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه‌ی پژمردگی، از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد. نتایج مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. لوله فرعی با دو و سه قطره‌چکان از نوع داخل خط و تنظیم‌شونده فشار ساخت شرکت نتافیم در زیر سطح خاک و در سه عمق ۴۰، ۴۵ و ۵۰ سانتی‌متری قرار داده شد. برای تأمین فشار سیستم (۱-۴ بار)، از یک پمپ کوچک با سیستم بای‌پس به



شکل ۱- نمایی از مدل فیزیکی

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و خصوصیات هیدرولیکی خاک

یافت	رس (درصد)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	جرم مخصوص ظاهری (گرم در سانتی‌متر مکعب)	رطوبت حجمی در مکش ۰/۳ اتمسفر (درصد)	رطوبت حجمی در مکش ۱۵ اتمسفر (درصد)	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر در روز)
لوم	۲۳	۳۱	۴۶	۱/۶	۲۶/۰۳	۱۱/۸۱	۷/۷۵

### توصیف مدل تجربی

هر کدام و جایگذاری مقادیر  $w^*$ ,  $v^*$  و  $D^*$  از معادلات فوق، رابطه ۴ به دست می‌آید (Singh et al., 2006):

$$w = A_1 v^{n_1} \left(\frac{K}{qz}\right)^{\left(n_1 - \frac{1}{2}\right)}, DA_2 v^{n_2} \left(\frac{K}{qz}\right)^{\left(n_2 - \frac{1}{2}\right)} \quad (4)$$

عامل اصلی در تعیین عمق نصب لاترال در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، مقدار حرکت رو به بالا و رو به پایین جبهه رطوبتی از محل نصب قطره‌چکان می‌باشد. از سوی دیگر تنها با دانستن میزان پیشروی جبهه رطوبتی در بالای قطره‌چکان می‌توان مشخص کرد که آب به سطح خاک می‌رسد یا خیر، زیرا یکی از اهداف آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کاهش تبخیر در نتیجه خشک ماندن سطح خاک در عمق کارگذاری مورد نظر است. از طرف دیگر، باید پیشروی کافی در پایین قطره‌چکان برای دریافت رطوبت مورد نیاز برای ریشه‌ها موجود باشد، از این رو به‌جای پارامتر  $D$  (عمق خیس‌شدگی) در اینجا از دو پارامتر  $z_+$ ،  $z_-$ ، به ترتیب عمق خیس شده در بالا و پایین قطره‌چکان، استفاده شد که تغییرات زیر (رابطه‌های ۵ و ۶) باید صورت گیرد.

$$z_+^* = z_+ \left(\frac{k}{qz}\right)^{\frac{1}{2}}, z_-^* = z_- \left(\frac{k}{qz}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$z_+^* = B_1 v^{e_1}, z_-^* = B_2 v^{e_2} \quad (6)$$

که در آن‌ها،

$B_1, B_2, e_1, e_2$  ضرایب جدید هستند. با به دست آوردن ضرائب روابط ۵ و ۶، رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$w = A_1 v^{n_1} \left(\frac{K}{qz}\right)^{\left(n_1 - \frac{1}{2}\right)}, z_- = B_2 v^{e_2} \left(\frac{K}{qz}\right)^{\left(e_2 - \frac{1}{2}\right)}, \quad (7)$$

$$z_+ = B_1 v^{e_1} \left(\frac{K}{qz}\right)^{\left(e_1 - \frac{1}{2}\right)}$$

سینگ و همکاران (Singh et al., 2006) مدل شوارتزمن و زور (Schwartzman & Zur, 1986) را برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی توسعه دادند. این محققان ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی را تابعی از دبی در واحد طول لاترال ( $q$ )، کل حجم آب خروجی در واحد طول لاترال ( $v$ )، هدایت هیدرولیکی خاک ( $k$ ) و عمق نصب قطره‌چکان ( $z$ ) فرض و با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه ۱ را تعریف کردند.

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0$$

$$\pi_1 = \frac{w}{z}, \pi_2 = \frac{v}{z^2}, \pi_3 = \frac{kz}{q}, \pi_4 = \frac{D}{z} \quad (1)$$

که در آن،

$D$  = فاصله سطح خاک تا پایین‌ترین قسمت پیاز رطوبتی است (سانتی‌متر). آنها با ترکیب معادلات بدون بعد در رابطه ۱ معادله‌ای بدون بعد به دست آوردند و پارامترهای حجم بدون بعد ( $v^*$ )، عرض خیس‌شدگی بدون بعد ( $w^*$ ) و عمق خیس‌شدگی بدون بعد ( $D^*$ ) را به صورت رابطه ۲ تعریف کردند.

$$v^* = v \left(\frac{k}{qz}\right), D^* = D \left(\frac{k}{qz}\right)^{\frac{1}{2}}, w^* = w \left(\frac{k}{qz}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

شوارتزمن و زور (Schwartzman & Zur, 1986) رابطه ۳ را بین پارامترهای بدون بعد عرض و عمق خیس‌شدگی پیشنهاد کردند.

$$w^* = A_1 v^{*n_1}, D^* = A_2 v^{*n_2} \quad (3)$$

که در آن،

$A_1, A_2, n_1, n_2$  پارامترهای تجربی هستند. با به دست آوردن ضرائب این دو معادله از نمودار گرافیکی مربوط به

و نگوختن - معلم استفاده می‌شود که به شرح رابطه‌های ۹ و ۱۰ است:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$k(h) = k_s s_e^l [1 - (1 - s_e^{1/m})^m]^2 \quad (10)$$

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

که در آن‌ها،

$\theta_s$  = رطوبت اشباع (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)؛  
 $\theta_r$  = رطوبت باقی‌مانده (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)؛  
 $k_s$  = هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر دقیقه)؛  
 $\alpha$  = (بر سانتی‌متر)؛  
 $n$  و  $l$  پارامترهای تجربی.

نرم‌افزار HYDRUS-2D از روش اجزای محدود گالریکین برای حل معادله جریان استفاده می‌کند. حوزه مورد استفاده برای حل عددی، مستطیلی با ابعاد  $50 \times 10$  سانتی‌متر به‌عنوان محدوده توزیع رطوبت با قطر  $1667$  گره انتخاب شد. قطره‌چکان به‌صورت یک دایره به قطر  $2$  سانتی‌متر و در فاصله  $10$  سانتی‌متری از گوشه سمت چپ در نظر گرفته شد و عمق آن نیز بسته به شرایط آزمایش در  $40, 45$  و  $50$  سانتی‌متر انتخاب گردید. مقدار رطوبت اولیه (شرایط اولیه) بر حسب مقادیر اندازه‌گیری شده و متناسب با اعماق سنسورهای پروفیل پروب (حسگر رطوبتی مورد استفاده در آزمایش) در نظر گرفته شد.

شرایط مرزی شامل شدت جریان متغیر در کل مدت زمان آبیاری برای قطره‌چکان است و در سطح فوقانی که معرف سطح خاک است، مرز آتمسفریک<sup>۱</sup> و در سطح تحتانی که معرف کف مدل فیزیکی است حالت زهکشی آزاد<sup>۲</sup> و برای جوانب سمت چپ و راست مرزهای بدون جریان<sup>۴</sup> در نظر گرفته شد. دلیل انتخاب مرز بدون جریان ایجاد شرایطی است برای متقارن در نظر گرفتن مدل برای

مراحل شبیه‌سازی عبارت‌اند از: ۱- با استفاده از درصد رس، شن، سیلت، رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی مزرعه و رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی دایم، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از مدل رزت<sup>۱</sup> برابر با  $7/75$  سانتی‌متر در روز تعیین گردید. ۲- به کمک رابطه ۲ و معلوم بودن مقادیر  $k, q, w^*, v^*$  و  $D^*$  در اعماق مختلف تعیین شدند و با رسم نمودار تغییرات  $w^*$  در مقابل  $v^*$  و تغییرات  $v^*$  در مقابل  $z_+$  و  $z_-$  ضرایب  $B_1, B_2, e_1, e_2$  محاسبه گردیدند. یک‌بار هم با ادغام نتایج مشاهده‌ای حاصل از سه عمق  $40, 45$  و  $50$  سانتی‌متر و رسم نمودار گرافیکی دیگری برای تغییرات  $w^*$  در مقابل  $v^*$  و تغییرات  $v^*$  در مقابل  $z_+$  و  $z_-$  یک سری ضریب جدید به‌دست آمد و برای رابطه نیمه‌تجربی خاک لومی آرایه شد. ۳- با ضرایب به‌دست آمده در مرحله قبل، رابطه‌های ۴ و ۷ تکمیل و از این نتایج جهت تعیین ابعاد پیشروی جبهه رطوبتی خاک لومی استفاده شد.

### توصیف مدل عددی

مدل HYDRUS2-D قادر به شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در شرایط اشباع و غیراشباع است. این مدل، حرکت سه بعدی آب در خاک را با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز (رابطه ۱) شبیه‌سازی می‌کند که با فرض خاک هم‌روند و یکنواخت به‌صورت رابطه ۸ ارائه می‌شود.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial y} + k(h) \right] \quad (8)$$

که در آن،

$\theta$  = رطوبت حجمی (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)؛  
 $h$  = پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (سانتی‌متر)؛  
 $t$  = زمان (دقیقه)؛  
 $x, y$  = مختصات افقی (سانتی‌متر)؛  
 $k$  = هدایت آبی (سانتی‌متر بر دقیقه) است.  
 برای به‌دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی، از معادله

1- ROSETTA  
 3- Free Drainage

2- Atmospheric Boundry  
 4- No Flux

برآورد ابعاد پیاز رطوبتی با مدل تجربی و مدل عددی...

و با رسم نمودارهای نمایی  $w^*$  در مقابل  $v^*$ ،  $z_+^*$  در مقابل  $v^*$  و  $z_-^*$  در مقابل  $v^*$ ، مقادیر  $w^*$ ،  $v^*$ ،  $z_+^*$ ،  $z_-^*$  محاسبه شد (شکل ۲).

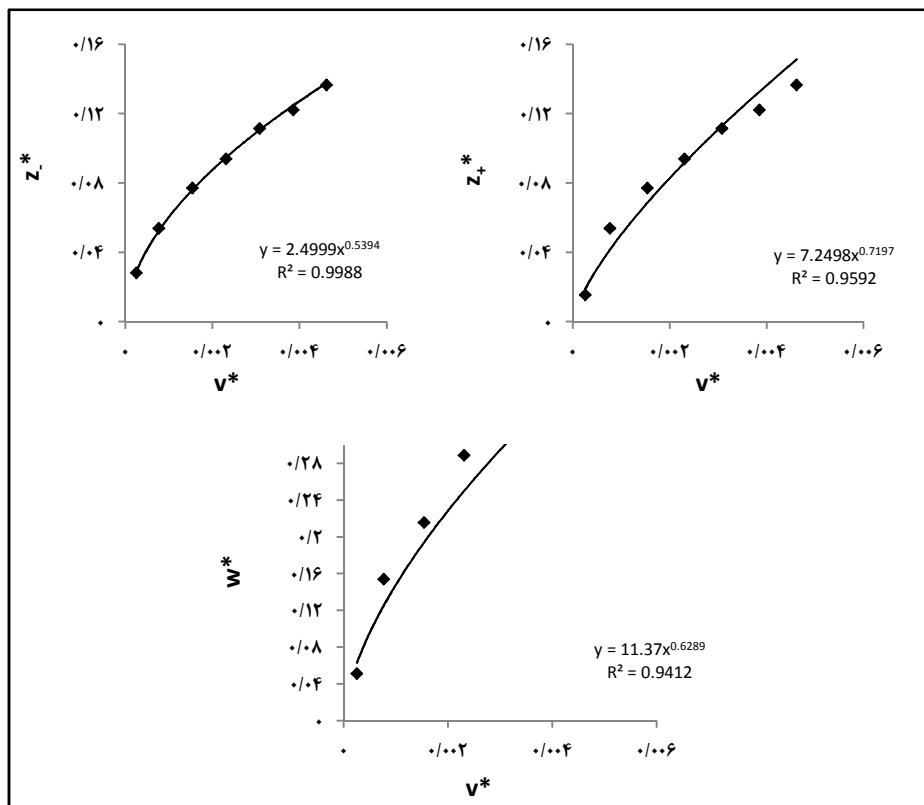
مقدار ضرایب  $A_1$ ،  $B_1$ ،  $B_2$ ،  $n_1$ ،  $e_1$  و  $e_2$  برای اعماق ۴۰، ۴۵ و ۵۰ سانتی متر (جدول ۲) و هم‌چنین برای خاک لومی (اثر سه عمق به‌طور هم‌زمان) به‌دست آمد. این ضرایب برای خاک لومی به‌ترتیب برابر با ۰/۶۳۴۷، ۰/۱۶۶۴۱، ۰/۵۸۵۸، ۰/۱۸۳۳۲، ۳/۷۱۱۴ و ۷/۵۱۷۹ می‌باشد.

حرکت آب در دو سمت. به این ترتیب به‌جای در نظر گرفتن طولی برابر با طول جعبه لایسیمتری، طول ۵۰ سانتی‌متر فرض شد. به این ترتیب زمان محاسبات کوتاه‌تر و با در نظر گرفتن تعداد بیشتری گره دقت محاسبات افزایش یافت.

## نتایج و بحث

### تعیین ضرایب مدل تجربی

با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش دوم



شکل ۲- نمودارهای نمایی برای به‌دست آوردن ضرایب تجربی

جدول ۲- پارامترهای تجربی حاصل از نمودارهای گرافیکی

$n_1$	$e_2$	$e_1$	$B_2$	$B_1$	$A_1$	عمق (سانتی‌متر)
۰/۶۲۸	-۰/۵۳۹	۰/۹۵۹	۲/۴۹	۷/۲۵	۱۱/۳۷	۴۰
۰/۶۶۹	۰/۴۸۵	۰/۷۴۲	۱/۵۳	۴/۵۲	۹/۷۷	۴۵
۰/۴۶	۰/۹۳۲	۰/۶۹	۹/۲۲	۵/۹۷	۵/۳۲	۵۰

حال با داشتن این ضرایب می توان معادلات تخمین ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی را به‌عنوان تابعی از  $k$ ،  $q$ ،  $z$  و  $v$  مطابق رابطه‌های ۱۱-۱۳ برای خاک لوم برآورد کرد.

$$w = 7/5179v^{0/5858} \left(\frac{K}{qz}\right)^{(0/0858)} \quad (11)$$

$$z_- = 2/8232v^{0/6347} \left(\frac{K}{qz}\right)^{(0/1347)} \quad (12)$$

$$z_+ = 3/7114v^{0/6641} \left(\frac{K}{qz}\right)^{(0/1641)} \quad (13)$$

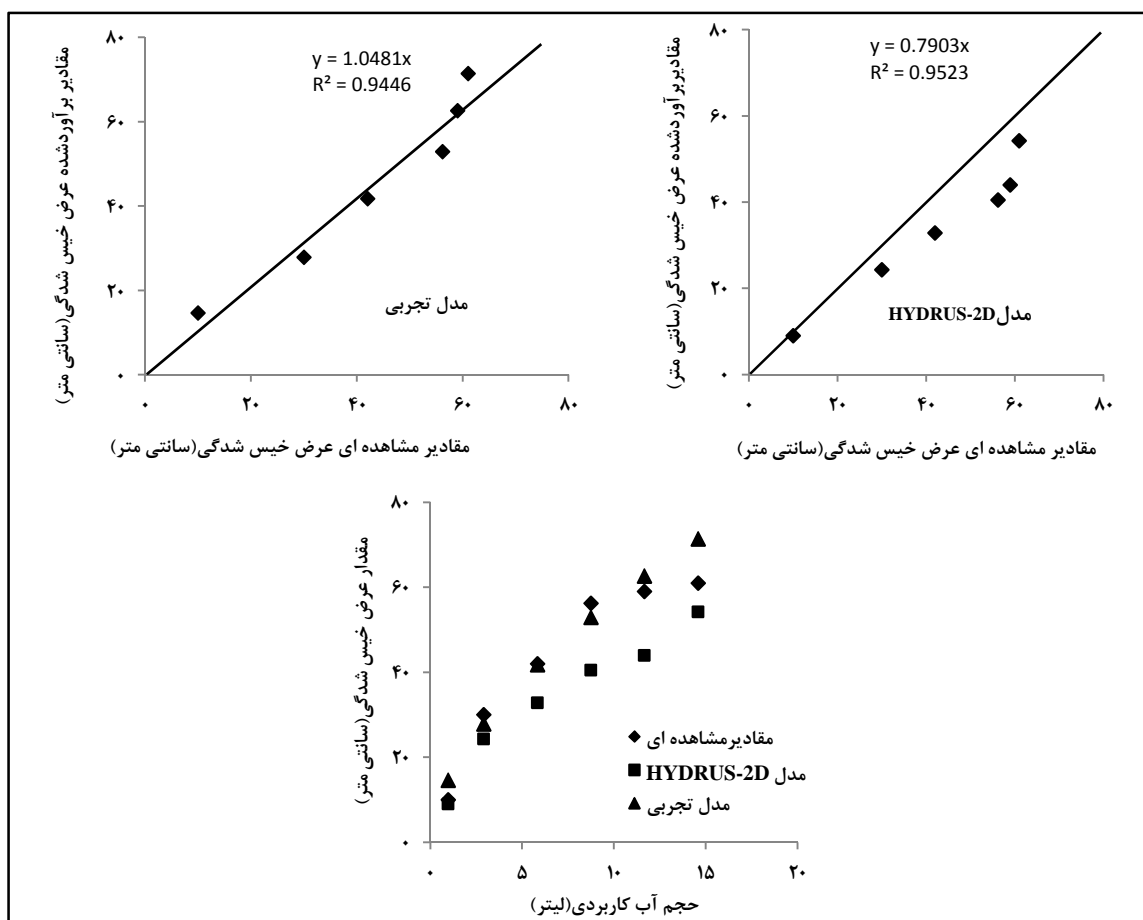
با توجه به شکل ۳ بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای عرض خیس‌شدگی با ضریب  $R^2$  برابر با ۰/۹۴ برای مدل تجربی و ۰/۹۵ برای مدل HYDRUS-2D همبستگی خوبی وجود دارد. انطباق خط رگرسیون بر خط نیم‌ساز نیز نشان‌دهنده دقت مدل در برآورد  $w$  است. ضریب زاویه خط رگرسیون یعنی ۱/۰۴۸۱ و ۰/۷۹۰۳ به عدد ۱ بسیار نزدیک است و حکایت از اختلاف ناچیز مقادیر مشاهده شده در مدل فیزیکی با مقادیر برآورد شده در مدل تجربی و مدل عددی دارد. همچنین، انطباق نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده عرض خیس‌شدگی به‌ازای حجم‌های مختلف آب کاربردی نشان از کارایی مدل دارد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مدل HYDRUS-2D مقادیر عرض خیس‌شدگی را کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد می‌کند که به‌دلیل پیوستن پروفیل رطوبتی بین دو قطره‌چکان در مشاهدات آزمایشگاهی و سخت شدن تشخیص مقدار پیشروی افقی

در این حالت است که به‌تبع آن نتایج مشاهداتی دقت کمتری دارد. بیشترین مقدار اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر برآورد شده توسط مدل تجربی و مدل HYDRUS-2D به‌ترتیب برابر با ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای عمق خیس‌شدگی در زیر قطره‌چکان با ضریب  $R^2$  برابر با ۰/۹۷ و ۰/۸۸ به‌ترتیب برای مدل تجربی و مدل HYDRUS-2D، همبستگی خوبی وجود دارد. انطباق خط رگرسیون بر خط نیم‌ساز نیز نشان‌دهنده دقت مدل در برآورد  $z_+$  است. ضرایب زاویه خط رگرسیون یعنی ۱/۰۲۹۸ و ۱/۱۱۰۶، به عدد ۱ بسیار نزدیک است و حکایت از اختلاف ناچیز مقادیر مشاهده شده در مدل فیزیکی با مقادیر برآورد شده در مدل تجربی و مدل HYDRUS-2D دارد.

انطباق خوب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده عمق خیس‌شدگی در زیر قطره‌چکان به‌ازای حجم‌های مختلف آب مصرفی بیانگر دقت روابط تجربی و مدل HYDRUS-2D در برآورد حرکت رو به پایین است که بیشترین اختلاف مشاهده شده تقریباً برابر با ۵ سانتی‌متر برای مدل عددی HYDRUS-2D و ۴ سانتی‌متر برای مدل تجربی است. طبق شکل ۳، مدل HYDRUS-2D میزان پیشروی رو به پایین را در ابتدای آبیاری کمی بیشتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند که می‌تواند به‌دلیل بالا بودن رطوبت اولیه خاک باشد ولی با گذشت زمان (افزایش حجم آب کاربردی)، بین داده‌های برآورد شده و مشاهداتی تطابق بیشتری وجود دارد.



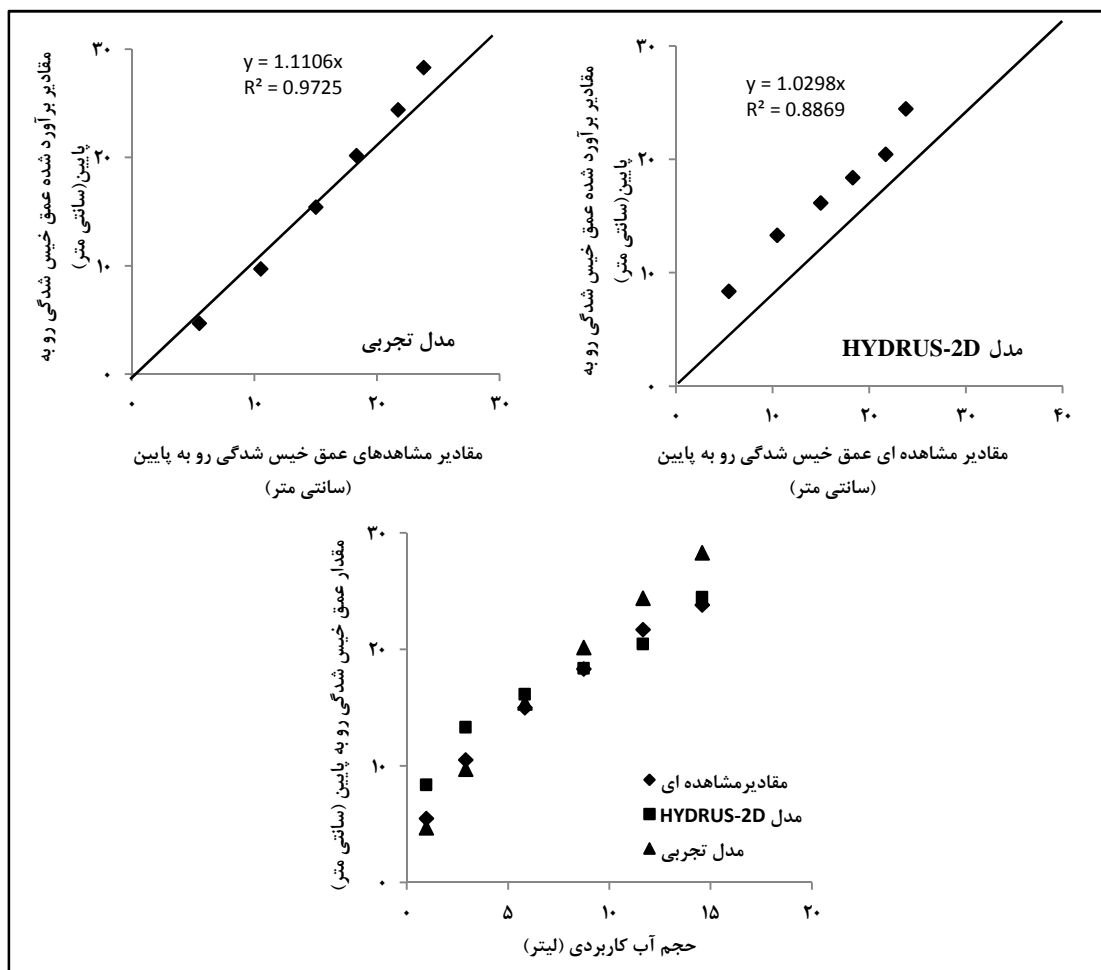
برآورد ابعاد پیاز رطوبتی با مدل تجربی و مدل عددی...



شکل ۳- رابطه بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده عرض خیس شدگی توسط مدل تجربی و مدل HYDRUS-2D و تغییرات عرض خیس شدگی بر حسب حجم آب کاربردی

تجربی به ازای حجم‌های مختلف آب مصرفی نشان‌دهنده دقت این مدل‌ها در برآورد حرکت رو به بالا است (شکل ۵). حداکثر اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر برآورد شده توسط مدل HYDRUS-2D برابر با ۵ سانتی‌متر است که برای مدل تجربی این مقدار به ۴ سانتی‌متر کاهش می‌یابد و این موضوع نشان‌دهنده دقت مدل تجربی نسبت به مدل HYDRUS-2D در برآورد حرکت رو به بالاست. از طرفی، با توجه به شکل ۵ که بیانگر کاهش دقت مدل تجربی با افزایش حجم کاربردی است، نمی‌توان فقط با در نظر گرفتن مقدار  $R^2$  قضاوت کرد.

همبستگی خوب بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده برای عمق خیس شدگی در بالای قطره‌چکان با ضریب  $R^2$  برابر با ۰/۹۸ برای مدل تجربی و ۰/۹۷ برای مدل HYDRUS-2D و انطباق نسبی خط رگرسیون بر خط نیم‌ساز، نشان‌دهنده دقت مدل در برآورد  $z$  است. ضریب زاویه خط رگرسیون یعنی ۰/۹۳۱۴ و ۰/۸۰۵۲ به عدد ۱ بسیار نزدیک است و حکایت از اختلاف ناچیز مقادیر مشاهده شده در مدل فیزیکی با مقادیر برآورد شده در مدل تجربی و مدل HYDRUS-2D دارد. انطباق نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده عمق خیس شدگی در بالای قطره‌چکان در هر دو مدل عددی و



شکل ۴- رابطه بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده عمق خیس شدگی زیر قطره‌چکان توسط مدل تجربی و مدل HYDRUS-2D و تغییرات عمق خیس شدگی زیر قطره‌چکان بر حسب حجم آب کاربردی

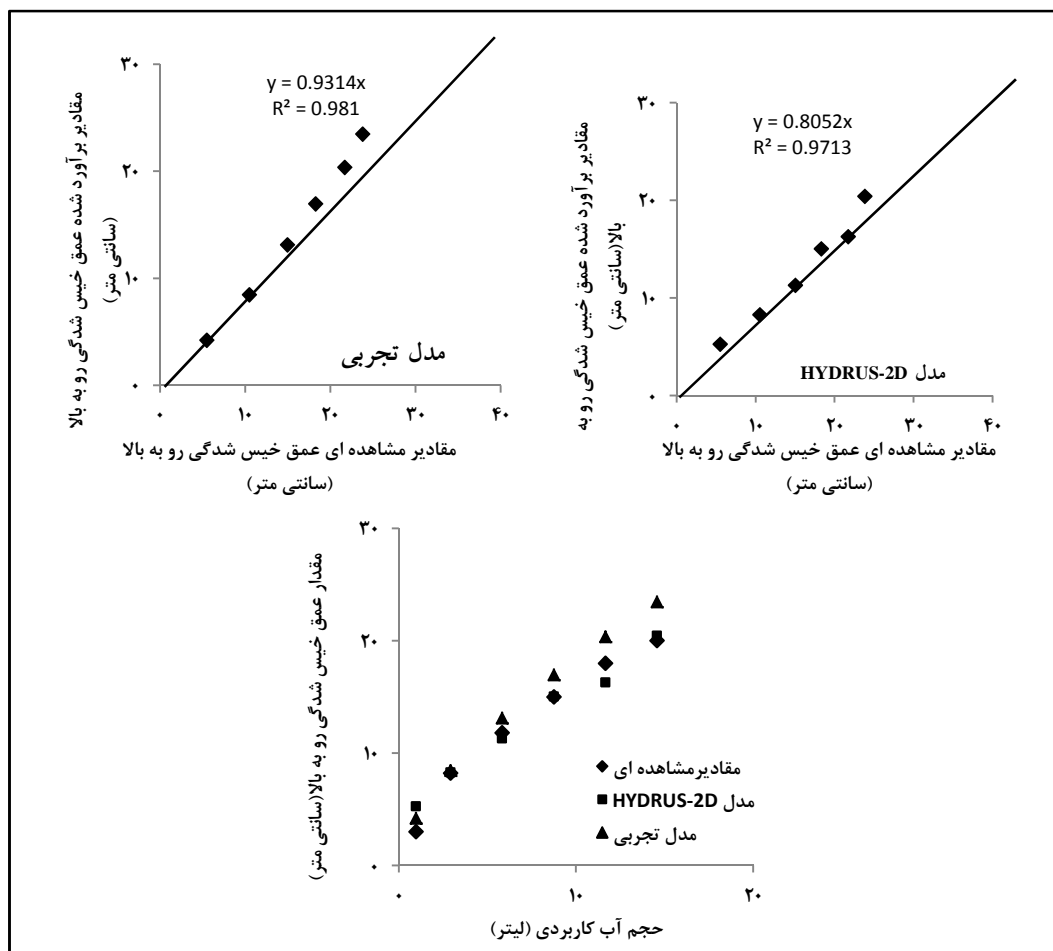
خیس شدگی در بالا و زیر قطره‌چکان می‌توان گفت که مدل تجربی، نسبت به مدل HYDRUS-2D بازده بهتری دارد. ارزیابی و مقایسه مقادیر  $R^2$ ، RMSE، ME و EF در شرایط مختلف تحقیق حاضر حاکی از توانایی بیشتر هر دو مدل تجربی و مدل HYDRUS-2D در پیش‌بینی مقادیر عمق خیس شدگی در بالا و پایین قطره‌چکان، در مقایسه با عرض خیس شدگی، است. انطباق کمتر بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده در عرض خیس شدگی به نسبت عمق خیس شدگی در بالا و پایین قطره‌چکان در شکل‌های ۴ و ۵ و نیز بیشتر بودن RMSE و ME عرض خیس شدگی به نسبت مقادیر متناظر عمق خیس شدگی

هرچه مقادیر RMSE کمتر باشد، کارایی مدل بهتر خواهد بود ولی با این پارامتر نمی‌توان مشخص کرد که مقادیر پیش‌بینی شده از مقادیر مشاهده شده بیشترند یا کمتر و از این رو از پارامتر میانگین خطا (ME) استفاده شد، به این ترتیب که مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده پیش‌بینی بیش‌تر و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده پیش‌بینی کمتر از مقادیر واقعی (مشاهده‌ای) است. با توجه به مقادیر درج شده در جدول ۳، هر دو مدل تجربی و HYDRUS-2D، مقادیر را بیشتر از مقدار واقعی<sup>۱</sup> برآورد می‌نمایند. EF نیز نشان‌دهنده بازدهی مدل است و با توجه به مقایر حاصل برای عرض خیس شدگی و عمق

برآورد ابعاد پياز رطوبتی با مدل تجربی و مدل عددی...

نیم‌ساز در مقادیر بالاتر عمق خیس‌شدگی در بالا و پایین قطره‌چکان دارد که بدان معنی است که با بزرگتر شدن پياز رطوبتی با افزایش زمان، توانایی و دقت هر دو مدل در برآورد عمق خیس‌شدگی در بالا و پایین نیز افزایش می‌یابد.

در بالا و پایین قطره‌چکان به‌علت به‌هم پیوستن جبهه رطوبتی در بین قطره‌چکان‌ها است و عدم شبیه‌سازی توسط هر دو مدل برای حالتی است که از دو قطره‌چکان کنار یکدیگر استفاده شده باشد. دقت نظر بیشتر در شکل‌های ۴ و ۵ حکایت از انطباق بیشتر نقاط روی خط



شکل ۵- رابطه بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده عمق خیس‌شدگی بالای قطره‌چکان توسط مدل تجربی و مدل HYDRUS-2D و تغییرات عمق خیس‌شدگی بالای قطره‌چکان بر حسب حجم آب کاربردی

جدول ۳- مقایسه آماری بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده ابعاد پياز رطوبتی

Ef		ME		RMSE		پارامترهای مورد مقایسه
مدل تجربی	HYDRUS-2D	مدل تجربی	HYDRUS-2D	مدل تجربی	HYDRUS-2D	
۰/۹۱	۰/۵۹	۰/۲	۰/۳۱	۰/۰۵	۰/۱۰	عرض خیس‌شدگی
۰/۹۰	۰/۹۶	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۱	حرکت رو به بالا
۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۱	۰/۰۱	حرکت رو به پایین

قطره‌چکان‌هایی با دبی ۳/۵ لیتر در ساعت و فاصله ۷۵ سانتی‌متر روی لوله‌های قطره‌چکان‌دار بررسی شد و نتایج نشان داد که بین مقادیر برآورد شده و مشاهده‌ای با ضریب تبیین ۰/۸۸ تا ۰/۹۷ برای مدل HYDRUS-2D و ۰/۹۴ تا ۰/۹۸ برای مدل تجربی، برازش خوبی موجود است و با استفاده از هر کدام از مدل‌های مذکور می‌توان تخمین قابل قبولی از شکل پیاز رطوبتی را به دست آورد.

اگرچه دقت شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D مورد تایید اکثر محققان است در مواردی به علت نیاز به اطلاعات ورودی زیاد، استفاده از این مدل امکان‌پذیر نیست یا اینکه نتایج خروجی به علت در نظر گرفتن فرضیات اولیه دور از واقعیت، عاری از دقت کافی است. از این رو در این شرایط استفاده از مدل تجربی، به دلیل ساده بودن و نیاز به پارامترهای کمتر (عمق نصب قطره‌چکان‌ها، دبی در واحد طول، کل حجم آب خروجی در واحد طول لوله‌های قطره‌چکان‌دار و هدایت هیدرولیکی خاک)، قابل توصیه است. با توجه به اینکه این تحقیق در شرایط آزمایشگاهی اجرا شده است، توصیه می‌شود در شرایط واقعی مزرعه و برای اعماق مختلف نصب قطره‌چکان و بافت‌های مختلف خاک نیز اجرا شود.

به طور کلی، بسیاری از محققان به‌ویژه سیمونک (Simunek, 2006)، ملایی‌کندلوس و همکاران (M- Kandelous *et al.*, 2008, 2011) در بررسی‌های خود نتیجه گرفتند که مدل HYDRUS-2D در حد قابل قبولی قادر به پیش‌بینی ابعاد پیاز رطوبتی در شرایط آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است و از این مدل می‌توان در شرایط مختلف آبیاری زیرسطحی استفاده کرد. نتایج حاصل از این تحقیق در خصوص کاربرد مدل HYDRUS-2D نیز با نتایج حاصل از تحقیقات این محققان و دیگران از جمله پروونزانو (Provenzano, 2007)، لازاروویچ و همکاران (Lazarovith *et al.*, 2007) مطابقت دارد ولی در خصوص کاربرد مدل تجربی کمی اختلاف مشاهده می‌شود که می‌توان آن را به ماهیت تجربی بودن مدل نسبت داد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق دقت شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D و مدل تجربی در برآورد الگوی توزیع رطوبت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط آزمایشگاهی در یک خاک لومی با سه عمق نصب ۴۰، ۴۵ و ۵۰ سانتی‌متر و

### مراجع

- Acar, b., Topak, R. and Mikailsoy, F. 2009. Effect of applied water and discharge rate on wetted soil volume in loam or clay-loam soil from an irrigated trickle source. *Afr. J. Agric. Res.* 1, 049-054.
- Ben-Asher, J. and Phene, C. J. 1996. Surface and subsurface drip irrigation: an analysis by a numerical model. Research Report. Jacob Blaustein Institute for Desert Research. Ben Gurion University of Negev. Negev, Israel.
- Chu, S. T. 1994. Green-Ampt analysis of wetting pattern for surface emitters. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120(2): 414-421.
- Elmaloglou, S. and Diamantopoulos, E. 2009. Simulation of water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agric. Water Manage.* 96, 1587-1595.
- Karimi Gogheri., Sh. Irandoust, M. and Hosseininia, M. 2011. Simulation of water content and evaporation in subsurface drip irrigation in sandy loam. *Water Resour. Eng. J.* 4, 49-60. (in Farsi)

- Lamm, F. R. and Camp, C. R. 2007. Subsurface Drip Irrigation. In: Lamm, F.R., Ayars, J. E. and Nakayama, F.S. (Eds.) Microirrigation for Crop Production: Design, Operation and Management. Elsevier Science Pub. 473-551.
- Lazarovith, N., Warrick, A. W., Furman, A. and Simunek, J. 2007. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *J. Vadose Zone*. 6, 116-123.
- Mailhol, J. C., Ruellea, P., Walserb, S., Schutzzeb, N. and Dejeana, D. 2011. Analysis of aet and yield predictions under surface and buried drip irrigation systems using the crop model pilote and Hydrus-2D. *Agric. Water Manage.* 98, 1033-1044.
- Mirzaei, F., Liaghat, A., Sohrabi, T. and Omid, M. 2006. Simulation of wetting pattern from line source in tape drip irrigation. *J. Agric. Eng. Res.* 6, 53-66. (in Farsi)
- M-Kandelous, M. and Simunek, J. 2010a. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agric. Water Manage.* 97, 1070-1076.
- M-Kandelous, M. and Simunek, J. 2010b. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrig. Sci.* 28, 435-444.
- M-Kandelous, M., Liaghat, A. and Abbasi, F. 2008. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimension alanalysis method. *J. Agric. Sci.* 39(2): 371-378 (in Farsi)
- M-Kandelous, M., Simunek, J., van Genuchten. and Malek, K. 2011. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75(2): 488-497.
- Patel Neelam. and Rajput, T. B . S. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agric. Water Manage.* 95, 1335-1349.
- Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation system. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133, 342-349.
- Provenzano, G. 2008. Discussion of using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in SDI System. *J. Irrig. Drain. Eng.* 10, 1061-1072.
- Schwartzman, M. and Zur, B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *J. Irrig. Drain. Eng.* 112, 242-253.
- Simunek, J., Sejna, M. and van Genuchten, M. Th. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimentional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0. U. S. Salinity Laboratory. USDA. ARS, Riverside, California.
- Simunek, J., van Genuchten, M. Th. and Sejna, M. 2006. The HYDRUS software package for simulating two and three- dimentional movment of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual. Version 1. 0. Pc Progress. Prague, Czech Republic.
- Singh, D. K., Rajput, T. B. S., Singh, D. K., Sikarwar, H. S., Sahoo, R. N. and Ahmad, T. 2006. Simulating of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agric. Water Manage.* 83, 130-134.

## **Numerical Versus Empirical Models for Estimating Wetting Patterns in Subsurface Drip Irrigation Systems**

**M. Khalili\*, M. Akbari, A. Hezarjaribi, M. Zakerinia and F. Abbasi**

\* Corresponding Author: M. Sc. Graduated Student of Irrigation & Drainage Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran. E-mail: mozhdeh733@gmail.com

Received: 30 November 2013, Accepted: 9 August 2014

Optimal use of water resources is essential to decrease cost and maximize available water resources. Subsurface drip irrigation can increase irrigation and water use efficiency. This irrigation method distributes water into the soil, leaving the surface of the soil dry and decreasing evaporation. In the design of subsurface drip irrigation (SDI) systems, the dimensions of the wetted onion determine the installation depth and spacing of the drippers. Several models have been developed to simulate soil moisture patterns and the wetting front using soil hydraulic parameters, emitter discharge rate and volume of water discharged. The present study used the powerful numerical model HYDRUS-2D and dimensional analysis, which requires fewer parameters to predict the wetted zone using the empirical method. The predicted values for wetting depth (upward, downward) and horizontal dimensions were compared with those obtained by laboratory testing conducted in loamy soil at 40 cm in depth.  $R^2$  varied from 0.88 to 0.97 for HYDRUS-2D and 0.94 to 0.98 for the empirical model. The results showed that the simulated and experimental results were in very good agreement and that the empirical model better predicted the dimensions of the wetted onion.

**Keywords:** Empirical model, HYDRUS-2D model, Subsurface drip irrigation, Wetting pattern