

نمود (Lubana et al., 2002).

اخماج و همکاران در تحقیقی با عنوان ارزیابی شعاع سطح خیس شده در آبیاری قطره‌ای نقطه‌ای در خاک‌های شنی از یک مدل فیزیکی با ابعاد $1 \times 1 \times 1$ متر مکعب استفاده گردید. در این مطالعه، حرکت آب در خاک همگن و بدون در نظر گرفتن تبخیر از سطح خاک مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر عددی شعاع سطح خیس شده برای هر جریان با مقادیر پیش بینی شده معادله پیشنهادی مقایسه شد. نتایج نشان داد که برای تمام سرعت‌های کاربردی تطبیق خوبی برقرار است (Ekhmaj et al., 2005).

العقیبی و همکاران در پژوهشی از یک مدل تجربی برای تخمین پیشروی افقی و عمودی الگوی خیس‌شدگی استفاده نمودند. آزمایش با آبیاری قطره‌ای سطحی در دو بافت خاک رسی و ماسه‌ای انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل با دقت قابل قبولی الگوی خیس‌شدگی خاک را تخمین می‌زند (Al-Ogaidi et al., 2016).

میرزایی و همکاران (۱۳۸۴) با دخالت عوامل فیزیکی مؤثر بر حجم خاک مرطوب شده در زیر منبع تغذیه خطی و با استفاده از قضیه π باکینگهام و آنالیز ابعادی، روابط نیمه‌تجربی ارائه دادند و اعلام کردند که نتایج برآورد شده همخوانی بسیار خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد.

هدف اصلی از این پژوهش ارائه معادلات علمی-تجربی و قابل اعتماد و درعین حال ساده برای تعیین ابعاد حجم خاک مرطوب شده در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از منبع نقطه‌ای می‌باشد. بدین منظور با به‌کارگیری آنالیز ابعادی، معادله اسپوارترمن و زور (۱۹۸۶) برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از منبع نقطه‌ای اصلاح گردید.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت. بدین منظور یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی به شکل مکعب با کسر یک‌چهارم از حجم آن به ابعاد $180 \text{ cm} \times 150 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$ از جنس ورقه‌های شفاف پلاستیکی گلاس و با چهارچوبی از نبشی‌های ۴ سانتی‌متری ساخته شد. در بخش تحتانی مدل خروجی‌هایی به عنوان زهکش برای خروج آب تعبیه گردید. قطره‌چکان‌های مورد استفاده از نوع روزنه ثابت بود. دبی قطره‌چکان چندین مرتبه قبل از قرارگیری در زیر سطح خاک با دقت بالایی کنترل می‌شد (آینه‌چی، ۱۳۸۷). در این پژوهش از سه بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین) استفاده شد. خاک مورد آزمایش ابتدا جهت جدا کردن قلوه سنگ، ریشه، بقایای محصولات زراعی و ... از سرندهای معمولی بنایی با قطر ۱۲ میلی‌متر عبور داده شد، سپس در کف آزمایشگاه جهت خشک شدن در هوای طبیعی پخش گردید. پس از ریختن خاک و پر کردن مدل، قطره‌چکان در زیر سطح خاک و

رطوبتی زیر یک قطره چکان صورت گرفته و مدل‌های عددی، ریاضی و تجربی مختلفی جهت شبیه‌سازی الگوی خیس‌شدگی خاک و ابعاد جبهه رطوبتی برای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی ارائه شده است که می‌توان به مدل‌های اسپوارترمن و زور، بن‌آشر و فنه و سیمونک و همکاران (۱۹۹۹ و ۲۰۰۶) اشاره کرد (Schwartzman and zur., 1986, Chu., 1994, Ben-Asher and Phene., 1996, Simunek et al., 2006, 1996). هر گروه (مدل‌های تجربی و مدل‌های عددی) معایب و مزایای خاص خود را دارد. مدل‌های تجربی درک و پیاده‌سازی آسان‌تری دارند اما به دلیل تقریب دقت کمتری نسبت به مدل‌های عددی دارند. از طرف دیگر مدل‌های عددی دقیق‌تر هستند اما درک و اجرای آن‌ها به مراتب پیچیده‌تر است (Elnesr and Alazba., 2019).

سینگ و همکاران در تحقیقی مدل اسپوارترمن و زور (۱۹۸۶) را برای آبیاری قطره‌ای با آنالیز ابعادی برای تعیین دو پارامتر W و D (به ترتیب عمق و عرض خیس شده) توسعه دادند. در این تحقیق بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد (Singh et al., 2006).

ملایی کندلوس و همکاران (۱۳۸۷) از روش ارائه‌شده توسط سینگ و همکاران (۲۰۰۶) برای تعیین مقادیر شکل پیاز رطوبتی در یک سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در یک خاک لوم رسی استفاده کردند. بین مقادیر اندازه‌گیری شده و خروجی مدل همبستگی خوبی (ضریب تبیین برابر $0/97$ ، $0/99$ و $0/97$ به ترتیب برای عرض خیس شده، عمق خیس شده در پایین و بالای قطره‌چکان) به دست آمد.

نصیری و همکاران (۱۳۹۰) در بررسی برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در خاک‌های شنی دشت قائم کرمان برای قطره‌چکان‌های با آبدی ۸، ۴ و ۲۴ لیتر در ساعت نشان دادند که به ازای حجم ثابت آب، با افزایش آبدی قطره‌چکان، شعاع خیس شده نسبت به عمق خیس شده افزایش بیشتری یافته و گسترش پیاز رطوبتی در قطره‌چکان‌های با آبدی بالاتر بیشتر بود.

خلیلی و همکاران (۱۳۹۳) از روش آنالیز ابعادی به‌عنوان یک روش تجربی و از مدل HYDRUS-2D به‌عنوان مدل عددی برای برآورد پیاز رطوبتی در سامانه قطره‌ای زیرسطحی در یک خاک لومی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل HYDRUS-2D ضریب تبیین بین $0/18$ و $0/97$ و مدل تجربی با ضریب تبیین بین $0/94$ و $0/98$ دقت خوبی در تعیین ابعاد پیاز رطوبتی داشتند.

لوبانا و همکاران در بررسی‌ای بر روی ابعاد پیاز رطوبتی در گیاه گوجه‌فرنگی در هند، از یک مدل ساده سه‌بعدی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که حرکت جانبی و حرکت عمودی آب در محدوده ریشه گیاه، یکسان است. این مشاهده اساس فرض شکل نیم کروی حجم خاک خیس شده در زیر یک قطره‌چکان نقطه‌ای را ایجاد

روش تعیین پارامترهای π این است که از n متغیر فوق به تعداد m که در اینجا ۲ می باشد انتخاب شود. سپس برای هر π متغیرهای فوق را به عنوان متغیرهای تکراری (k, q) همراه با یک متغیر غیر تکراری (W, V, Z, D) استفاده گردد. لذا پارامترهای π را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\pi_1 = W^1 \times K^{b_1} \times q^{c_1} \quad (3)$$

$$\pi_2 = D^1 \times K^{b_2} \times q^{c_2} \quad (4)$$

$$\pi_3 = Z^1 \times K^{b_3} \times q^{c_3} \quad (5)$$

$$\pi_4 = V^1 \times K^{b_4} \times q^{c_4} \quad (6)$$

در معادلات فوق q و k برای هر π به عنوان متغیر تکراری و V, W, D, Z به عنوان متغیر غیر تکراری محسوب می شود. در معادلات فوق باید توان ها طوری تعیین شوند که هر π بدون بعد باشد. لذا توان های L و T در سمت چپ معادلات صفر در نظر گرفته می شوند. پس از تعیین ضرایب توان ها معادلات زیر به دست می آید.

$$\pi_1 = W \times \left[\frac{K}{q} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\pi_2 = D \times \left[\frac{K}{q} \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\pi_3 = Z \times \left[\frac{K}{q} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$\pi_4 = V \times \left[\frac{K}{q} \right]^{3/2} \quad (10)$$

با توجه به اینکه نتیجه ترکیب معادلات بدون بعد یک معادله بدون بعد می باشد، لذا خواهیم داشت:

$$V^* = V \times \left(\frac{K \times Z^{1/2}}{q} \right)^2 \quad (11)$$

$$W^* = W \times \left(\frac{K}{q} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$D^* = D \times \left(\frac{K}{q} \right)^{1/2} \quad (13)$$

پس از رسم V^* در برابر W^* و D^* خواهیم دید که رابطه توانی زیر را می توان برقرار نمود:

$$W^* = A_1 V^{*n_1} \quad (14)$$

$$D^* = A_2 V^{*n_2} \quad (15)$$

که در آن n_1, n_2, A_1, A_2 پارامترهای تجربی هستند. از ترسیم مقادیر W^* و D^* در برابر V^* ضرایب این دو معادله به دست خواهد آمد. با جایگذاری معادلات ۱۱، ۱۲ و ۱۳ در معادلات ۱۴ و ۱۵ روابط زیر به دست می آید:

$$W = A_1 V^{n_1} Z^{n_1} \left(\frac{K}{q} \right)^{(2n_1-1/2)} \quad (16)$$

$$D = A_2 V^{n_2} Z^{n_2} \left(\frac{K}{q} \right)^{(2n_2-1/2)} \quad (17)$$

از آنجایی که در آبیاری قطره ای زیر سطحی حرکت رو به بالا و رو

در عمق ۳۰ سانتی متری قرار گرفت. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک مزرعه از روش پارافین با ۵ تکرار استفاده شد و میانگین اعداد حاصله به عنوان چگالی ظاهری خاک انتخاب شد. همچنین برای تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک تهیه شده در مدل و مطابقت آن با جرم مخصوص ظاهری خاک مزرعه از استوانه های کوچکی استفاده گردید و جرم مخصوص نمونه های خاک از تقسیم وزن خاک خشک به حجم استوانه تعیین شد. جهت تعیین هدایت هیدرولیکی خاک های مورد مطالعه از نرم افزار رزتا نسخه ۱/۲ که در سال ۲۰۰۰ توسط انجمن شوری خاک امریکا منتشر شده بود، استفاده گردید. این نرم افزار با استفاده از سیستم شبکه عصبی و با دادن درصدهای شن، سیلت و رس و همچنین درصد رطوبت در ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم می تواند هدایت هیدرولیکی خاک را تخمین زند. جهت تعیین بافت خاک و دانه بندی آن از دستگاه دانه بندی لیزری استفاده گردید و برای تعیین درصد رطوبت خاک در FC و PWP از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد. نتایج مشخصات فیزیکی خاک های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجایی که برای آزمایش ها صحت سنجی مدل نیاز به تعیین جبهه رطوبتی در خاک های مورد آزمایش بود، لذا در مزارعی که خاک های آن ها در مدل استفاده گردید، آزمایش ها صحرائی انجام گرفت.

تشریح مدل

در خصوص تعیین پارامترهای فیزیکی مؤثر در ابعاد خاک مرطوب شده در اطراف یک منبع تغذیه نقطه ای در پایان یک آبیاری و تعریف تابع مورد نظر می توان گفت عمق (D) و قطر خاک مرطوب شده (W) توسط یک قطره چکان، تابعی از شدت جریان قطره چکان (q) ، حجم آب به کار برده شده (V) ، هدایت هیدرولیکی خاک (K) و عمق قرار گیری لاترال (Z) می باشد. مدل اسچوارتزمن و زور (۱۹۸۶) را می توان با استفاده از قضیه فوق، برای استفاده در سیستم آبیاری قطره ای زیر سطحی از منبع نقطه ای و با در نظر گرفتن عمق قرار گیری لاترال و فرضیات مناسب اصلاح نمود. با استفاده از روش آنالیز ابعادی، تابع مربوطه به شکل معادله (۱) نوشته می شود.

$$f(W, V, K, q, Z, D) = 0 \quad (1)$$

گام اول در آنالیز ابعادی یعنی تعیین تعریف تابع مورد نظر برداشته شد. تئوری π با کینگهام ثابت می کند که در یک مسئله فیزیکی که n مقدار و m بعد وجود دارد مقادیر را می توان به صورت $n-m$ پارامتر بدون بعد مستقل مرتب نمود. در تابع فوق ۶ متغیر بعد دار و دو بعد اصلی (L, T) وجود دارد. یعنی $n=6$ و $m=2$. بنابراین به تعداد $n-m=4$ عدد بدون بعد خواهیم داشت. که به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \quad (2)$$

$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$ نمایانگر گروه های بدون بعد هستند.

پارامتر با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_s - C_o)^2 \quad (25)$$

مقدار مثبت ME نشانگر برآورد بالا و مقدار منفی آن بیانگر برآورد پایین مدل است. قدر مطلق ME عملکرد مدل را نشان می‌دهد. راندمان مدل (EF) پارامتر دیگری برای ارزیابی عملکرد مدل بود. این پارامتر توسط رابطه زیر تعریف شده است:

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_s - C_o)^2}{\sum_{i=1}^N (C_o - C)^2} \quad (26)$$

که در آن، C متوسط داده‌های مشاهداتی است و دیگر پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند.

معیار پذیرش برتری عملکرد مدل کم بودن مقادیر RMSE و قدر مطلق مقدار ME و همچنین بزرگ بودن مقدار EF می‌باشد (Singh et al., 2006).

نتایج و بحث

با استفاده از درصد رس، شن، سیلت، رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی مزرعه و رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی دائم، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از مدل رزتسا برابر با ۱۳/۶۵، ۱۲/۰۴ و ۹۹/۵۲ سانتی‌متر در روز به ترتیب برای خاک‌های لوم رسی سیلتی، لوم و شنی تعیین گردید. با استفاده از روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ و معلوم بودن مقادیر k، q، مقادیر W*، V* و D* در بافت‌های مختلف تعیین شدند و با رسم نمودار تغییرات W* مقابل V* و تغییرات V* مقابل Y*+ و Y*- (شکل‌های ۱، ۲ و ۳). به معادلات W، Y+ و Y- محاسبه گردید (شکل‌های ۱، ۲ و ۳). معادلات تخمین ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای را به‌عنوان تابعی از k، q، z و v برای سه بافت خام لوم رسی سیلتی، لوم و شنی تعیین گردید و جدول ۲ ارائه شده است. ابعاد خاک مرطوب در حالت منبع نقطه‌ای و در زیر سطح خاک توسط آزمایش بر روی سه نوع خاک و سه تکرار تعیین گردید.

به پایین جبهه رطوبتی از محل نصب قطره‌چکان اهمیت زیادی دارد و یکی از عوامل اصلی در تعیین عمق نصب لاترال می‌باشد به‌جای پارامتر D از دو پارامتر Y+ و Y- به ترتیب، عمق خیس شده در پایین قطره‌چکان و عمق خیس شده در بالای قطره‌چکان استفاده می‌شود. لذا تغییرات زیر می‌بایست صورت پذیرد:

$$Y_+^* = Y_+ \left(\frac{K}{q}\right)^{1/2} \quad (18)$$

$$Y_-^* = Y_- \left(\frac{K}{q}\right)^{1/2} \quad (19)$$

$$Y_+^* = A_3 V^{n_3} \quad (20)$$

$$Y_-^* = A_4 V^{n_4} \quad (21)$$

که A3, A4, n3, n4 پارامترهای تجربی هستند.

با جایگذاری معادلات ۱۱، ۱۸ و ۱۹ در معادلات ۲۰ و ۲۱ روابط

زیر به دست می‌آید:

$$Y_+ = A_3 V^{n_3} Z^{n_3} \left(\frac{K}{q}\right)^{(2n_3-1/2)} \quad (22)$$

$$Y_- = A_4 V^{n_4} Z^{n_4} \left(\frac{K}{q}\right)^{(2n_4-1/2)} \quad (23)$$

عملکرد شبیه‌سازی مدل

در این تحقیق برای بررسی میزان اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی از مقایسه واریانس و میانگین داده‌ها استفاده گردید. مقایسه داده‌ها توسط نرم‌افزار صفحه گستر 22 SPSS انجام شد. می‌توان از آماره ریشه دوم میانگین خطا (RMSE)، برای بررسی خطای عملکرد مدل استفاده نمود. این پارامتر توسط معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_s - C_o)^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

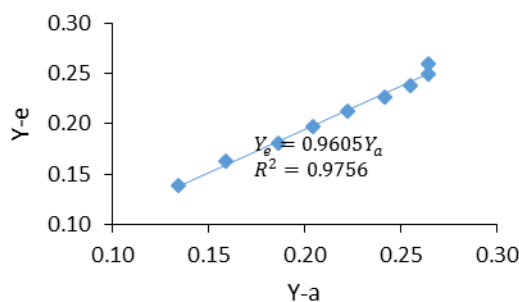
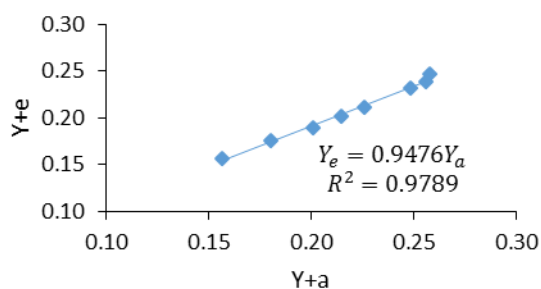
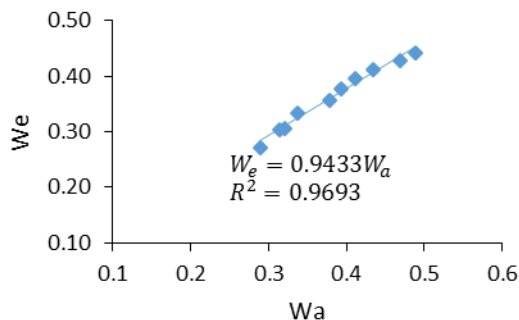
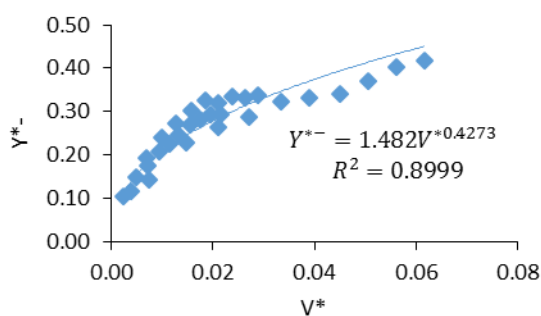
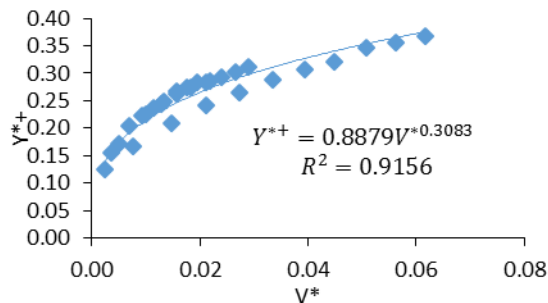
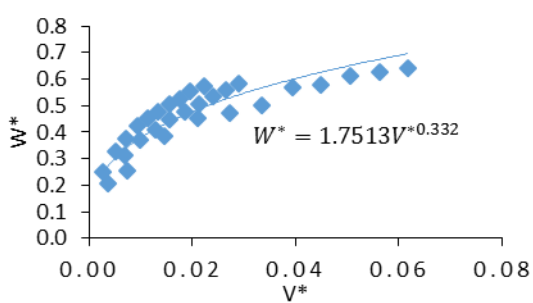
که در آن N: کل تعداد داده‌ها، Cs: مقادیر محاسباتی، Co: مقادیر مشاهداتی می‌باشد. از آنجایی که مقدار RMSE نمی‌تواند درجه برآورد پایین یا بالای مقادیر محاسباتی توسط مدل را نشان بدهد، لذا بدین منظور برای تعیین دقت مقادیر محاسباتی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی از پارامتر آماری میانگین خطا (ME) استفاده شد. این

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و خصوصیات هیدرولیکی خاک

بافت خاک	درصد رس	درصد شن	درصد سیلت	درصد رطوبت حجمی fc	درصد رطوبت حجمی pwp	هدایت هیدرولیکی (cm/day)	جرم مخصوص ظاهری (gr/cm3)
لوم رسی سیلتی	۲۷/۲	۱۳/۸	۵۹	۳۹/۳	۱۹/۲	۱۳/۶۵	۱/۳۶
لوم	۱۵/۱۲	۵۰/۲۷	۳۴/۶۱	۲۵/۶	۱۸/۰۱	۱۲/۰۴	۱/۶
شنی	۲/۹۷	۹۴/۷۲	۲/۳۱	۶/۹۹	۵/۳	۹۹/۵۲	۱/۷۲

جدول ۲- معادلات تجربی ابعاد پیاز رطوبتی در بافت‌های مختلف خاک

لوم رسی سیلتی	شنی	لومی	بافت خاک
$w = 2.9158 v^{0.4366} z^{0.4366} \left[\frac{k}{q} \right]^{0.3732}$	$w = 1.596 v^{0.3006} z^{0.3006} \left[\frac{k}{q} \right]^{0.1012}$	$w = 1.751 v^{0.332} z^{0.332} \left[\frac{k}{q} \right]^{0.164}$	سنگریز
$Y_+ = 1.358 V^{0.5033} Z^{0.5033} \left[\frac{k}{q} \right]^{0.5066}$	$Y_+ = 0.5186 V^{0.2179} Z^{0.2179} \left[\frac{k}{q} \right]^{-0.0642}$	$Y_+ = 0.8879 V^{0.3083} Z^{0.3083} \left[\frac{k}{q} \right]^{0.1166}$	
$Y_- = 3.583 V^{0.7063} Z^{0.7063} \left[\frac{k}{q} \right]^{0.9126}$	$Y_- = 2.1569 V^{0.47923} Z^{0.47923} \left[\frac{k}{q} \right]^{0.4584}$	$Y_- = 1.482 V^{0.4273} Z^{0.4273} \left[\frac{k}{q} \right]^{0.3546}$	



شکل ۱- نمودارهای نمایی برای به دست آوردن ضرایب تجربی خاک لومی

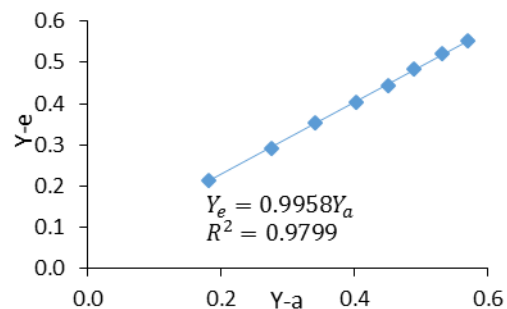
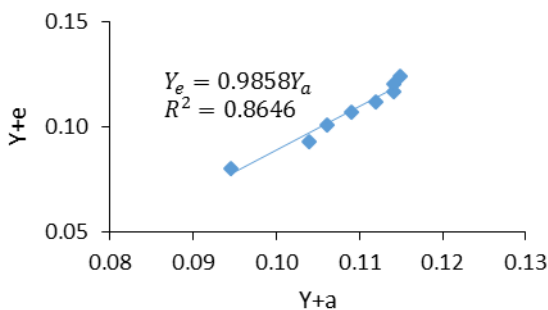
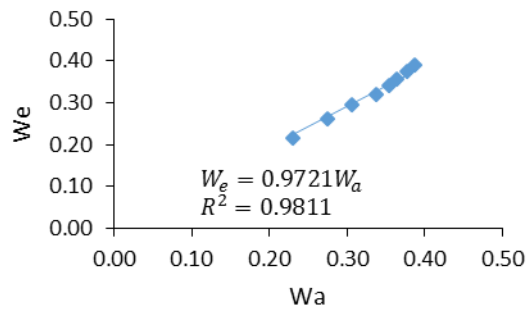
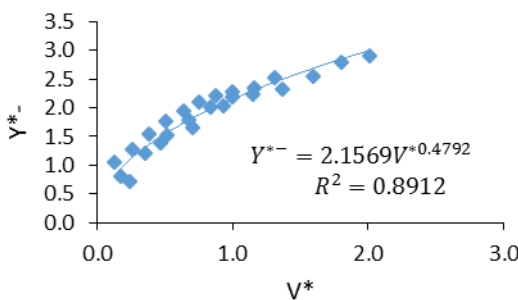
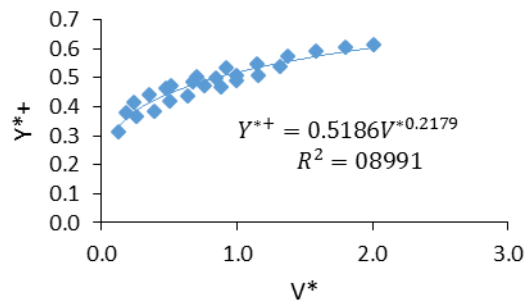
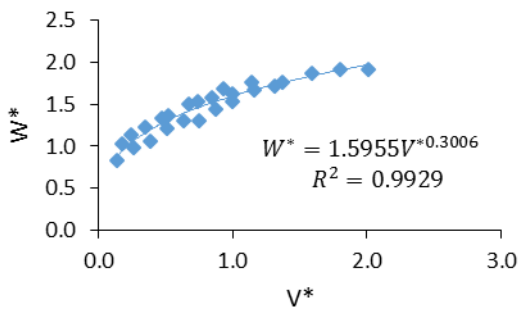
قرار گرفت و میزان ضریب همبستگی آن‌ها تعیین شد. هر یک از نمودارها منحصرأً به حالت خاصی از آزمایش، از نظر بافت خاک مربوط

مقدار عمق و قطر خاکی که از طریق مدل برآورد شد (محاسباتی)، با مقادیر مشاهده شده در خاک‌های مختلف مورد مقایسه

اندازه‌گیری شده و برآورد شده در بالا و پایین قطره‌چکان به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۷۸۹ و ۰/۹۷۵۶ همبستگی خوبی وجود دارد. ضریب زاویه‌ای معادله رگرسیون یعنی ۰/۹۴۷۶ و ۰/۹۷۵۶ به عدد یک بسیار نزدیک است و بیانگر این است که بین مقادیر مشاهده‌شده در مدل فیزیکی و مقادیر برآورد شده با مدل تجربی اختلاف ناچیز وجود دارد. انطباق خوب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده در بالا و پایین قطره‌چکان بیانگر دقت روابط مدل تجربی در برآورد جهت حرکت آب در بالا و پایین قطره‌چکان می‌باشد.

است و یادآوری این نکته لازم به نظر می‌رسد که هیچ‌کدام از آن‌ها تکرار یک حالت خاص آزمایش می‌باشد.

با توجه به شکل ۱ بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای عرض خیس شده در خاک لوم با ضریب تبیین R^2 برابر ۰/۹۶۹۳ همبستگی خوبی وجود دارد. ضریب زاویه معادله رگرسیون یعنی ۰/۹۴۳۳ به عدد یک بسیار نزدیک است و بیانگر اختلاف ناچیز مقادیر مشاهده در مدل فیزیکی و مقادیر برآورد شده در مدل تجربی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است بین مقادیر

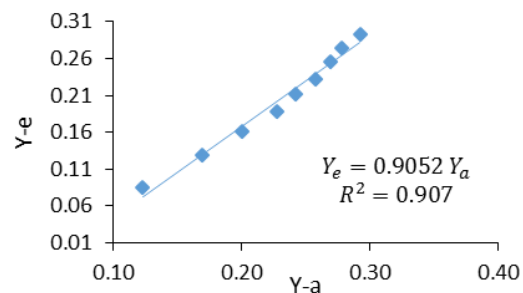
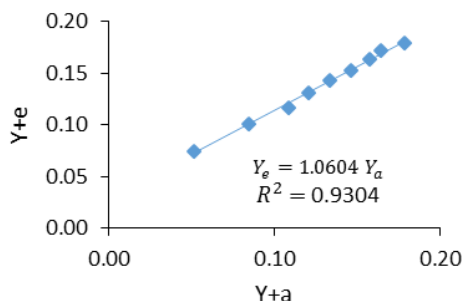
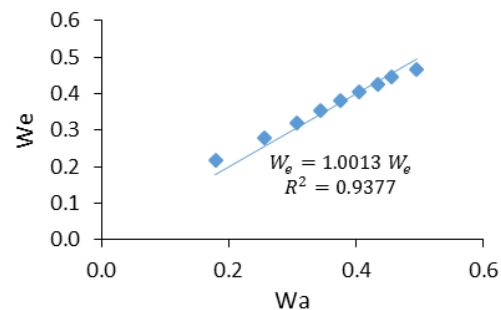
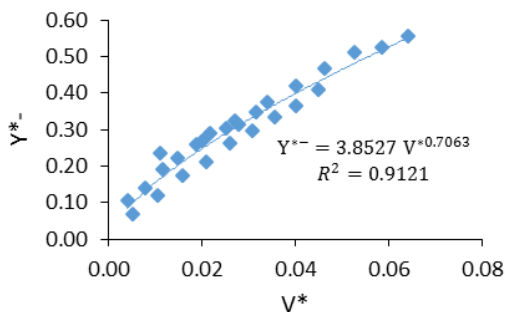
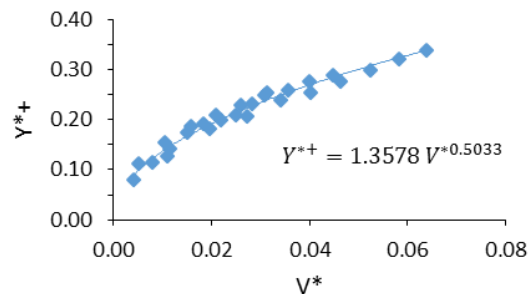
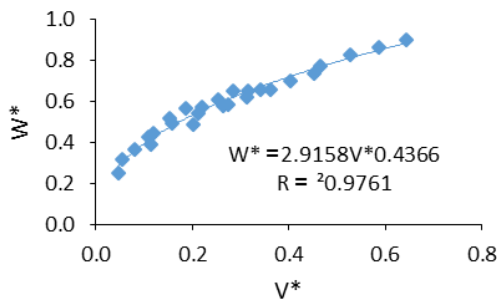


شکل ۲- نمودارهای نمایی برای به دست آوردن ضرایب تجربی خاک شنی

یعنی $1/0.13$ به عدد یک بسیار نزدیک است و بیانگر اختلاف ناچیز مقادیر مشاهده در مدل فیزیکی و مقادیر برآورد شده در مدل تجربی می باشد. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده در بالا و پایین قطره چکان به ترتیب با ضریب تبیین 0.9304 و 0.907 همبستگی خوبی وجود دارد. ضریب زاویه ای معادله رگرسیون یعنی $1/0.604$ و 0.9052 به عدد یک بسیار نزدیک است و بیانگر این است که بین مقادیر مشاهده شده در مدل فیزیکی و مقادیر برآورد شده با مدل تجربی اختلاف ناچیز وجود دارد. انطباق خوب بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده در بالا و پایین قطره چکان بیانگر دقت روابط مدل تجربی در برآورد جهت حرکت آب در بالا و پایین قطره چکان هست.

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده در بالا و پایین قطره چکان به ترتیب با ضریب تبیین 0.8646 و 0.9799 همبستگی خوبی وجود دارد. ضریب زاویه ای معادله رگرسیون یعنی 0.9858 و 0.9958 به عدد یک بسیار نزدیک است و بیانگر این است که بین مقادیر مشاهده شده در مدل فیزیکی و مقادیر برآورد شده با مدل تجربی اختلاف ناچیز وجود دارد. انطباق خوب بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده در بالا و پایین قطره چکان بیانگر دقت روابط مدل تجربی در برآورد جهت حرکت آب در بالا و پایین قطره چکان می باشد.

با توجه به شکل ۳ بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده برای عرض خیس شده در خاک لوم با ضریب تبیین R^2 برابر 0.9377 همبستگی خوبی وجود دارد. ضریب زاویه معادله رگرسیون



شکل 3- نمودارهای نمایی برای به دست آوردن ضرایب تجربی خاک لوم رسی سیلتی

آزمایش قرار گرفت. این آزمایش‌ها به صورت جداگانه با دبی‌های ۵/۵۲ و ۲/۶۳ لیتر در ساعت به ترتیب برای خاک‌های لومی و لوم رسی سیلتی و دبی ۲/۵۹ لیتر در ساعت برای خاک شنی انجام شد. نتایج این بررسی در جدول ۳ ارائه شده است، مطابق این جدول، از آنجایی که در تمام موارد $\text{Sig.} > 0.05$ است، نتیجه گرفته می‌شود که مقادیر محاسبه شده t و f در سه نوع خاک کمتر از مقادیر بحرانی آن‌ها است. بنابراین فرض عدم برابری واریانس‌ها و میانگین‌ها رد شد، و فرض صفر یعنی برابری واریانس‌ها و میانگین‌ها مورد تأیید قرار گرفت. سپس نتیجه گرفته شد که مقادیر مشاهداتی و مقادیر محاسباتی اختلاف معنی داری در سطح ۵٪ ندارند. این مطلب نشان داد که این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی عمق و عرض خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از منبع نقطه‌ای استفاده شود.

همان طوری که در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود ضریب تبیین بالایی بین مقادیر قطر محاسباتی و عمق محاسباتی در بالا و پایین قطره چکان با مقادیر مشاهداتی متناظر آن‌ها وجود دارد. ضریب تبیین در تمام موارد بیش از ۹۶ درصد بود. این مطلب بیانگر دقت بالای برآورد مدل‌های به دست آمده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت مدل توسعه یافته، عمق و عرض خیس‌شدگی را در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از منبع نقطه‌ای به خوبی برآورد می‌نماید.

عملکرد مدل توسط مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی، برای تضمین قابلیت کاربرد مدل در شرایط مزرعه بررسی شد. بدین منظور فرض برابری واریانس‌ها و میانگین‌ها در سطح معنی داری ۵٪ با درجه آزادی ۱۶ برای خاک‌های لومی و لوم رسی سیلتی و ۱۴ برای خاک شنی با استفاده از آزمون‌های f تست و t تست و نرم افزار SPSS مورد

جدول ۳- مقادیر محاسبه شده F و t و سطح معنی داری برای قطر و عمق خیس‌شدگی در سه نوع خاک

نوع خاک	پارامتر ارزیابی	آماره آزمون F	سطح معنی داری Sig.	آماره آزمون t	سطح معنی داری Sig.
لوم	W	۰/۲۳۶	۰/۶۳۴	۰/۷۱۹	۰/۴۸۳
	Y+	۰/۲۵۸	۰/۶۱۸	۰/۷۳۹	۰/۴۷۰
	Y-	۰/۳۲۶	۰/۵۷۶	۰/۳۶۸	۰/۷۱۸
لوم رسی سیلتی	W	۰/۳۷۱	۰/۵۵۱	-۰/۱۰۴	۰/۹۱۸
	Y+	۰/۱۸۹	۰/۶۷۰	-۰/۵۶۲	۰/۵۸۲
	Y-	۰/۵۹۴	۰/۴۵۲	۰/۸۷۹	۰/۳۹۲
شنی	W	۰/۰۳۶	۰/۸۵۲	۰/۳۶۰	۰/۷۲۴
	Y+	۳/۷۶۶	۰/۰۷۳	۰/۳۵۹	۰/۷۲۵
	Y-	۰/۱۴۴	۰/۷۱۰	-۰/۰۴۵	۰/۹۶۴

حدودی تخمین بالا و پایین از مقادیر قطر و عمق خیس شده را داشت و ارزیابی عملکرد مدل نیز خوب بود.

راندمان عملکرد مدل برای قطر خیس‌شدگی به ترتیب برای خاک‌های شن، لوم و لوم رسی سیلتی ۹۴/۲۹، ۸۴/۹۱ و ۹۵/۹۱ درصد و برای عمق خیس‌شدگی در بالای قطره چکان ۹۶/۸۱، ۸۵/۴۳ و ۹۰/۶۵ درصد و این مقدار برای عمق خیس‌شدگی در پایین قطره چکان برابر با ۹۸/۴۶، ۹۴/۱۳ و ۸۱/۰۶ درصد بود. از آنجایی که راندمان عملکرد مدل نیز در تمام موارد بالا بود، می‌توان نتیجه گرفت که مدل حاصله می‌تواند برای تخمین عمق و قطر خیس‌شدگی خاک در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) از منبع نقطه‌ای استفاده گردد.

به طور کلی بسیاری از محققان از جمله خلیلی و همکاران (۱۳۹۳) و قربانی واقعی و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی‌های خود نتیجه گرفتند که مدل تجربی آنالیز ابعادی در حد قابل قبولی قادر به پیش بینی ابعاد پیاز رطوبتی در شرایط آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌باشد و از این مدل می‌توان در شرایط مختلف آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده

عملکرد مدل همچنین بر اساس پارامترهای آماری ریشه دوم میانگین خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و راندمان مدل (EF) با استفاده از فرمول‌های (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) ارزیابی شد. مقدار RMSE برای قطر خیس‌شدگی به ترتیب برای خاک‌های شن، لوم و لوم رسی سیلتی ۱/۲۲، ۲/۴۷ و ۱/۹۲ سانتی متر بود. این مقدار برای عمق خیس‌شدگی در بالای قطره چکان به ترتیب برابر با ۰/۷۷۵، ۱/۲۶۹ و ۱/۱۷۷ سانتی متر به دست آورده شد. همچنین مقدار آن برای عمق خیس‌شدگی در پایین قطره چکان به ترتیب برابر با ۱/۵۳، ۱/۰۸ و ۳/۰۱ سانتی متر بود. مقدار میانگین خطا برای قطر خیس‌شدگی به ترتیب برای خاک‌های شن، لوم و لوم رسی سیلتی ۰/۰۱۵، ۰/۰۶۱ و ۰/۰۳۷ سانتی متر بود. این مقدار برای عمق خیس‌شدگی در بالای قطره چکان به ترتیب برابر با $۵/۹۹ \times 10^{-3}$ ، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۱۴ سانتی متر به دست آورده شد. همچنین مقدار آن برای عمق خیس‌شدگی در پایین قطره چکان به ترتیب برابر با ۰/۰۲۴، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۰۹ سانتی متر بود.

از مقادیر به دست آمده فوق می‌توان نتیجه گرفت که مدل تا

پياز رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای تحت منبع نقطه‌ای. پژوهش کشاورزی. ۸. ۳: ۴۵-۵۵.

خان محمدی، ن.، و بشارت، س. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی تجربی ابعاد پياز رطوبتی بافت های مختلف خاک. مجله علوم آب و خاک. ۲۰: ۷۷-۱۳۳.

خلیلی، م.، اکبری، م.، هزارجریبی، ا.، ذاکری‌نیا، م.، و عباسی، ف. ۱۳۹۳. برآورد ابعاد پياز رطوبتی با مدل تجربی و مدل عددی HYDRUS-2D در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی. ۱۵: ۱-۱۴.

قربانی واقعی، ح.، و علی بهرامی، ح. ۱۳۹۵. آنالیز ابعادی الگوی خیسیدگی خاک از کپسول‌های رسی متخلخل، مجله پژوهش آب ایران. ۱: ۲۰: ۷۷-۸۵.

محمدی، ع.، بیگلویی، م.ح.، خالدیان، م.، مریدنژاد، ع.، و رجبی، ج. ۱۳۹۲. بررسی ابعاد پياز رطوبتی در اراضی شیب‌دار. مجله علوم آب و خاک. ۱۷: ۶۶: ۱۰۹-۱۲۰.

ملایی کندلوس، م.، لیاقت، ع.، و عباسی، ف. ۱۳۸۷. برآورد ابعاد پياز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با استفاده از آنالیز ابعادی. علوم کشاورزی ایران. ۲: ۳۷۱-۳۷۸.

میرزایی، ف.، لیاقت، ع.، سهرابی، ت.، و امید، م. ح. ۱۳۸۴. نمون‌سازی جبهه رطوبتی خاک از منبع تغذیه خطی در آبیاری قطره‌ای- نواری. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۲۱۶: ۱-۱۴.

نصیری، ش.، نشاط، ع.، و کهنوجی، م. ۱۳۹۰. تعیین معادله‌های تجربی برآورد ابعاد پياز رطوبتی تحت آبیاری قطره‌ای در خاک‌های متوسط- شنی) مطالعه موردی دشت قائم آباد، کرمان. مجله مهندسی منابع آب ۴: ۸۷-۹۰.

Al-Ogaidi, Ahmed A.M., Wayayok, A., Rowshon, M.K and Abdull, A.F. 2016. Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model, Agricultural Water Management. 176: 203-213.

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. 12.2:414-421.

Ekhmaj, A.I., Amin, M.S.M., Salim, S., and Zakaria, A.A. 2005. Wetted surface radius under point-source trickle irrigation in sandy soil. Agric. Eng. 14.2: 67-

کرد. بررسی نتایج مطالعه خلیلی و همکاران (۱۳۹۳) و قربانی واقعی و همکاران (۱۳۹۵) به ترتیب نشان داد که ضریب تبیین بین ۰/۹۴ تا ۰/۹۸ و ۸۹/۹ تا ۹۰/۹ برای مدل تجربی آنالیز ابعادی به دست آمد. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج محققان دیگر از جمله سینگ و همکاران (۲۰۰۶)، ملایی کندلوس و همکاران (۱۳۸۷) و حیدری و همکاران (۱۳۸۷) مطابقت دارد.

نتیجه گیری

آنالیز رگرسیون خطی مقادیر قطر محاسباتی و عمق محاسباتی در بالا و پایین قطره چکان و مقادیر مشاهداتی متناظر آن‌ها نشان داد که ضریب تبیین بالایی در تمام موارد در سه نوع خاک وجود دارد. ضریب تبیین در تمام موارد بیش از ۹۶ درصد بود. این مطلب بیانگر دقت مدل‌های توسعه یافته است. در نتیجه این مدل‌ها عمق و عرض خیس شدگی را در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به خوبی برآورد می‌نماید. عملکرد شبیه‌سازی مدل توسط مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی، برای تضمین قابلیت کاربرد مدل در شرایط مزرعه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور فرض برابری واریانس‌ها و میانگین‌ها در سطح معنی‌داری ۵٪ با استفاده از آزمون‌های f تست و t تست و نرم افزار spss مورد آزمایش قرار گرفت. از آنجایی که در تمام موارد $\text{Sig} > 0.05$ بود نتیجه گرفته شد که مقادیر محاسبه شده f و t کمتر از مقادیر بحرانی آن‌ها است. لذا فرض صفر یعنی برابری واریانس‌ها و میانگین‌ها مورد تایید قرار گرفت. سپس نتیجه گرفته شد که مقادیر مشاهداتی و محاسباتی اختلاف معنی‌داری ندارند. از آنجایی که راندمان عملکرد و همچنین دقت برآورد مدل در تمام موارد بالا بود می‌توان نتیجه گرفت که مدل حاصله می‌تواند برای تخمین عمق و قطر خیس شدگی خاک در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) از منبع نقطه‌ای استفاده گردد.

منابع

آینه‌چی، ج. ۱۳۸۷. برآورد ابعاد پياز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از آنالیز ابعادی. رساله کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

حیدری، ز.، فراستی، م.، و قبادیان، ر. ۱۳۹۷. بررسی اثر دبی بر الگوی خیس شده تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D مجله مهندسی آبیاری و آب ایران. ۳۲.۸: ۱۳۲-۱۴۴.

حیدری، م.، ملک، ک.، ملایی کندلوس، م.، محسنی موحد، س.، ا.، و کریمی، ت. ۱۳۸۷. بررسی مدل‌های تجربی در شبیه‌سازی ابعاد

- simulating the two-dimensional 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-dimensional movement 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.
- Siyal A.A. and Skaggs T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*, doi:10.1016/j.agwat. 75.
- Elnesr, M.N. and Alazba, A.A. 2019. Computational evaluations of HYDRUS simulations of drip irrigation in 2D and 3D domains (ii-subsurface emitters). *Computers and Electronics in Agriculture*.163.
- Lubana, P.P.S., Narda, N.K., and Brown, L.C. 2002. Application of a hemispherical model to predict radius of wetted soil volume under point source emitters for trickle irrigated tomatoes in Punjab state. *ASAE* 32.6: 42243-42257.
- Qiaosheng, S., Zouxin, L., Zhenying, W. and Hijung, L. 2007. Simulation of the soil wetting shape under porous pipe sub-irrigation using dimensional analysis. *Irrigation and Drainage*. 56: 389-398.
- Schwartzman, M., and Zur, B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *J. Irrig and Drain. Eng.* 112.3: 242-253.
- Simunek, J., Sejna, M. and van Genuchten, M. Th. 1999. The HYDRUS-2D software package for

Estimating Soil Moisture Pattern under Subsurface Drip Irrigation Using Dimensional Analysis Method

S. Zandi^{1*}, S. Boroumand-Nasab², J. Ainechee³
Received: Oct.16, 2019 Accepted: Jan.01, 2020

Abstract

In designing and implementing irrigation systems, it is essential to know how Wetting Pattern form soils and their components. Simulation for each design and management scenario, in addition to highly acceptable results, saves time. The main purpose of this study was to provide equations for determination of soil moisture pattern in subsurface irrigation from point source. For this purpose, by applying dimensional analysis, the Schwartzman and zur equation for subsurface drip irrigation from point source was modified. By constructing a physical model and using three types of sand, loam and silty clay loam texture, the equations coefficients were extracted and 9 equations were obtained. For the developed simulation model in three soil type, RMSE values was smaller than 2.47, 1.27 and 3.01 cm for wetted width, upper and lower trickle placement respectively. It was found that performance of model was good with model efficiency greater than 81% for all cases. Therefore, it can be used to describe wetted depths and widths of soil under SDI system with point source of water application.

Keywords: Subsurface Drip Irrigation, Dimensional Analysis, Wetting Front, Wetting Pattern, Model efficiency

1- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2- Professor, Department of Irrigation and Drainage, faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3- Student of Irrigation and Drainage, faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: saeedzandee@yahoo.com)