



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و سوم، شماره ششم، ۱۳۹۵
<http://jwsc.gau.ac.ir>

شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک اطراف قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای پالسی و پیوسته به روش آنالیز ابعادی

*آرش محمدبیگی^۱، فرهاد میرزایی^۲ و نگین اشرف^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران،

^۲دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۲

چکیده

سابقه و هدف: در دهه‌های اخیر آبیاری قطره‌ای به جهت کاهش آب کاربردی، افزایش در عملکرد گیاه و توزیع بهتر کود مورد توجه قرار گرفته است. کاهش آب کاربردی به این دلیل است که در آبیاری قطره‌ای به‌جای همه سطح زمین فقط خاک محدوده ریشه گیاه مرطوب می‌شود. آبیاری پالسی مجموعه‌ای از چرخه‌ها است که هر کدام از چرخه‌ها از یک فاز آبیاری و یک فاز استراحت تشکیل می‌شود. کاربرد متناوب آب در آبیاری قطره‌ای باعث می‌شود که جبهه پیشروی با آب کمتری نسبت به جریان مداوم تکمیل گردد. آبیاری قطره‌ای پالسی با مدیریت خوب، پتانسیل زیادی در بهبود توزیع یکنواختی آب در خاک و در نهایت افزایش جذب به‌وسیله ریشه گیاه را به‌صورت توانمند به همراه دارد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از یک مدل فیزیکی برای شبیه‌سازی حالت آبیاری قطره‌ای در مزرعه استفاده شد. سه تیمار بافت خاک سنگین، متوسط و سبک، دو تیمار دبی قطره‌چکان ۲/۴ و ۸ لیتر بر ساعت (به ترتیب Q_1 و Q_2) و دو روش آبیاری قطره‌ای پالسی و پیوسته به‌کار گرفته شد. در ادامه با استفاده از یکی از روش‌های مطرح در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک، یعنی آنالیز ابعادی و با استفاده از قضیه π باکینگهام و به‌دست آوردن تعدادی اعداد بی‌بعد و ارتباط بین اعداد بی‌بعد یک سری معادلاتی حاصل می‌شود که این معادلات امکان برآورد توزیع رطوبت و الگوی جبهه پیشروی و چگونگی توزیع آن‌ها در محدوده مرطوب شده خاک را فراهم می‌کنند. در آخر هم به‌منظور مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده از شاخص‌های آماری حداکثر خطا (ME) و میانگین ریشه دوم خطا (RMSE) استفاده گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد مؤلفه افقی رطوبت در دبی ۲/۴ لیتر بر ساعت در حالت پالسی برای خاک‌های رسی، لومی و شنی به ترتیب ۳۳، ۳۰ و ۲۰/۵ می‌باشد که بیش‌تر از توزیع افقی رطوبت در حالت پیوسته (به ترتیب ۲۸، ۲۶ و ۱۸/۶ سانتی‌متر) است. مؤلفه عمودی رطوبت در دبی ۲/۴ لیتر بر ساعت در حالت پالسی (به ترتیب برای رس، لوم و شن ۲۱/۲، ۲۷ و ۵۰ سانتی‌متر) برای همه خاک‌ها بیش‌تر از حالت پیوسته (به ترتیب ۱۹، ۲۲ و ۴۳ سانتی‌متر) است. با مقایسه توزیع رطوبت در جهت افقی نشان می‌دهد که مؤلفه افقی خاک مرطوب شده هم برای پالسی و هم برای

* مسئول مکاتبه: a.mohammadbeigi@ut.ac.ir

پیوسته در دبی ۸ لیتر بیش‌تر از دبی ۲/۴ لیتر است. افزایش مؤلفه‌های افقی و عمودی رطوبت در آبیاری پالسی را می‌توان این‌طور استدلال کرد که کاربرد متناوب آب در آبیاری قطره‌ای باعث می‌شود که جبهه پیشروی با آب کم‌تری نسبت به جریان مداوم تکمیل گردد همچنین با استفاده از روش آنالیز ابعادی معادلاتی برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در اطراف قطره‌چکان برای دو حالت آبیاری پالسی و پیوسته به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: با ارزیابی توسط شاخص‌های آماری مشخص شد که عملکرد معادله‌های پیشنهادی در سطح مطلوب قرار داشته و نتایج آن‌ها از اعتبار قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای پالسی، آنالیز ابعادی، توزیع رطوبت، شبیه‌سازی جبهه پیشروی

مقدمه

در دهه‌های اخیر آبیاری قطره‌ای به جهت کاهش آب‌کاربرد، افزایش در عملکرد گیاه و توزیع بهتر کود مورد توجه قرار گرفته است. کاهش آب‌کاربرد به این دلیل است که در آبیاری قطره‌ای به‌جای همه سطح زمین فقط خاک محدوده ریشه گیاه مرطوب می‌شود. برای اطمینان از مرطوب شدن مناسب خاک محدوده توسعه ریشه گیاه توسط قطره‌چکان نیازمند مشخص بودن الگوی خیس‌شدگی خاک می‌باشد. الگوی خیس‌شدگی خاک اطراف ریشه گیاه به عواملی نظیر کل حجم آب‌کاربرد، دبی قطره‌چکان‌ها، خصوصیات فیزیکی خاک و مدیریت آبیاری بستگی دارد (۸). آبیاری قطره‌ای پالسی یا متناوب از جدیدترین روش‌های آبیاری است که کاربرد حجم پایین آب را به همراه دارد. آبیاری پالسی مجموعه‌ای از چرخه‌ها است که هر کدام از چرخه‌ها از یک فاز آبیاری و یک فاز استراحت تشکیل می‌شود (۱۲). کاربرد متناوب آب در آبیاری قطره‌ای باعث می‌شود که جبهه پیشروی با آب کم‌تری نسبت به جریان مداوم تکمیل گردد زیرا در فاز بعدی آبیاری نفوذپذیری در بخش مرطوب شده در فاز قبلی آبیاری کاهش می‌یابد. آبیاری قطره‌ای پالسی با مدیریت خوب، پتانسیل زیادی در بهبود توزیع یکنواختی آب

در خاک و در نهایت افزایش جذب به‌وسیله ریشه گیاه را به‌صورت توأمان به همراه دارد. این روش در خاک‌هایی با نفوذپذیری نسبتاً زیاد تأثیر بیش‌تری دارد. در آبیاری قطره‌ای پالسی به‌جای این‌که از ابتدا تا انتهای آبیاری جریان پیوسته‌ای از آب در داخل خاک برقرار باشد، جریان آب به دفعات متناوب قطع و وصل می‌شود. هر دوره زمانی دارای یک زمان وصل جریان (مدت زمانی که آب در خاک جریان دارد) و زمان قطع (مدت زمان بین پایان جریان ارسالی و شروع دوره زمانی جریان بعدی) می‌باشد که می‌تواند به‌صورت ثابت و یا متغیر باشد. بنابراین دوره زمانی هر جریان آب، برابر با مجموع زمان قطع و وصل می‌باشد. زمانی که جریان آب وصل می‌شود، جریان با سرعت بیش‌تری در داخل خاک پیشروی می‌نماید. دلیل این امر آن است که آب در دوره قبلی پیشروی، خاک را مرطوب کرده و باعث کاهش نفوذپذیری در این مناطق شده است. بنابراین جریان زیادتری جهت پیشروی به‌سمت خاک خشک پیش‌رو قابل دسترس می‌باشد. بررسی توزیع رطوبت به‌عنوان یک موضوعی مهم، هم برای پژوهش‌های مزرعه‌ای و هم برای مدل‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار است (۹، ۳، ۶، ۲۱، ۵، ۲۲).

دبی باعث گسترش بیشتر جبهه رطوبتی در جهت افقی و کاهش دبی باعث گستردگی جهت عمقی می‌شود (۱۵). مشکلات و همکاران (۱۹۹۹) یکی از راه‌های مؤثر برای بهینه کردن برنامه‌ریزی آبیاری را استفاده از حل عددی معادلات جریان برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک بیان کرده‌اند (۱۶). کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰a) مدل تحلیل WetUp و مدل عددی HUDRUS و مدل‌های تجربی شوارتزمن و کندلوس و امین را برای تخمین الگوی جبهه رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای مقایسه کردند نشان دادند که مدل HYDRUS نسبت به دیگر روش‌ها دارای خطای کم‌تری می‌باشد (۱۰). لوین و همکاران (۱۹۷۷) در پژوهشی کاهش تلفات نفوذ را در آبیاری تناوبی گزارش کردند و همچنین نشان دادند که الگوی خیس‌شدگی برای هر دو روش پالسی و پیوسته در دبی‌های پایین توسط منبع نقطه‌ای تقریباً یکسان بود (۱۳، ۱۴). مستقیمی و میشل (۱۹۸۳) بیان کردند در آبیاری قطره‌ای پالسی نسبت به روش پیوسته کاهش مشخصی از تلفات آب زیر منطقه توسعه ریشه مشهود است و پخش جانبی آب در خاک افزایش می‌یابد (۱۹). پیتس (۱۹۹۱) پژوهشگران در ادامه با اعمال دو تیمار فرکانس آبیاری (سه بار در روز و یک بار در روز) به این نتیجه رسیدند که فرکانس آبیاری تأثیری روی عملکرد گوجه‌فرنگی ندارد اما تراکم طولی ریشه در عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تیمار با فرکانس بیشتر تراکم طولی ریشه کم‌تر می‌شود (۲۰). بیسن (۲۰۰۳) در پژوهشی عنوان شد گیاهان آبیاری شده به روش پالسی، تنش آبی کم‌تری خواهند داشت که منجر به رشد سریع گیاه و سالم‌تر بودن آن می‌شود. از مزایای دیگر روش پالسی، پیشگیری از بیماری‌های گیاهی مطرح کردند (۲). دل

المال‌اغلو و دیامان توپوس (۲۰۰۹) توزیع مجدد رطوبت را در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی برای دو روش مختلف آبیاری (پیوسته و پالسی) و در شرایط آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که به حساب آوردن پدیده توزیع مجدد رطوبت در مقدار آب آبیاری باعث کاهش آب آبیاری می‌شود و تأثیر پدیده توزیع مجدد رطوبت در قطره‌چکان‌هایی با دبی بیشتر، بیش از قطره‌چکان‌هایی با دبی کم‌تر است (۸). کوک و همکاران (۲۰۰۶) دو مدل WetUp و HYDRUS را به منظور تخمین جبهه رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی مقایسه کردند و دریافتند که مدل عددی دارد HYDRUS پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به مدل تحلیلی WetUp دارد. چرا که در مدل تحلیلی، یک سری فرضیات برای حل معادله به‌کار رفته است که باعث شده نتایج آن با نتایج واقعی اختلاف زیادی داشته باشد (۴). میرزایی و همکاران (۲۰۰۵) به منظور شبیه‌سازی جبهه رطوبتی، روابطی را 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 به دست آوردند. در نهایت این رابطه‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده واسنجی شد و رابطه‌های علمی تجربی به دست آمد که هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایش‌ها داشتند. علاوه بر آن، معادله‌های ارائه‌شده تابعی از زمان هستند و در هر زمان امکان محاسبه قطر و عمق خاک خیس شده وجود دارد (۱۷). لی و همکاران (۲۰۰۴) توزیع جبهه رطوبتی را در آبیاری قطره‌ای برای دو نوع بافت خاک لومی و شنی مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفتند که می‌توان شکل توزیع جبهه رطوبتی را برای آبیاری قطره‌ای به صورت توابع نمای نشان داد و همچنین به این نتیجه رسیدند که افزایش

مواد و روش‌ها

تئوری: یکی از روش‌های مطرح در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک روش آنالیز ابعادی است در این روش با استفاده از قضیه π باکینگهام و به دست آوردن تعدادی اعداد بی‌بعد و ارتباط بین اعداد بی‌بعد یک سری معادلاتی حاصل می‌شود که این معادلات امکان برآورد توزیع رطوبت و الگوی جبهه پیشروی و چگونگی توزیع آن‌ها در محدوده مرطوب شده خاک را فراهم می‌کنند. دبی. هدایت هیدرولیکی. حجم آب نفوذیافته به خاک. زمان آبیاری روی قطر و عمق خاک مرطوب شده تأثیر دارند. با استفاده از قضیه باکینگهام می‌توان نوشت (۱۷):

$$f(D, Z, q, K_s, V, t) = 0 \quad (1)$$

که در آن، به ترتیب توزیع آب در جهت افقی و عمودی، دبی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی خاک، حجم آب کاربردی و زمان آبیاری هستند. در این رابطه ۶ متغیر بعددار و دو متغیر اصلی (L و T) وجود دارند که در نتیجه آن، $n - m = 4$ عدد بدون بعد خواهیم داشت. اگر π_i نشان‌دهنده معادلات بی‌بعد متغیرهای V, K_s, q و t باشد، رابطه بالا را می‌توان به شکل رابطه ۲ نوشت:

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (2)$$

روش تعیین عدد بدون بعد π بدین صورت است که از n متغیر بالا به تعداد m (در اینجا ۲) متغیر انتخاب شود، برای هر π مربوط به متغیرهای بالا، از دو متغیر تکراری همراه با یک متغیر غیرتکراری استفاده می‌شود و در نهایت معادله‌های بدون بعد به شکل رابطه‌های زیر حاصل می‌شوند:

(۱۹۹۳) یک محدودیت آبیاری پالسی را افزایش نمک‌های محلول در خاک عنوان کردند. برای رفع این مشکل، مقدار کمی کود به صورت محلول که از حرکت سریع نمک به میانه‌های خاک جلوگیری می‌کند پیشنهاد شد و همچنین این روش نیاز آبتوی را کاهش می‌دهد (۷). کوت و همکاران (۲۰۰۳) در پژوهشی دیگر گزارش کردند شعاع و عمق خاک مرطوب در روش آبیاری پالسی نسبت به روش آبیاری پیوسته بیش‌تر افزایش می‌یابد (۵). پلنگی و آخوندعلی (۲۰۰۸) به ارائه روابطی نیمه تجربی با تأثیر عوامل فیزیکی حاکم بر پیشروی آب در خاک در آبیاری قطره‌ای تحت منبع تقطه‌ای و قضیه π باکینگهام پرداختند. روابط ارائه شده با استفاده از الگوهای رطوبتی به دست آمده واسنجی شد و به منظور صحت‌سنجی آن، روابط علمی- تجربی به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفتند (۱). محمدزاده و همکاران (۲۰۱۴) مدلی دو متغیره خطی تابعی از دبی قطره‌چکان و مدت زمان آبیاری برای محاسبه عرض خیس شده در خاک‌های سنگریزه‌ای با بافت لوم شنی توسعه دادند و با مدل‌های پیشنهادی پژوهش‌های پیشین برای خاک مورد مطالعه ارزیابی کردند (۱۸). کریمی و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی به کمک قضیه π باکینگهام و با استفاده از آنالیز ابعادی روابطی به منظور پیش‌بینی الگوی توزیع مجدد رطوبت خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به روش آنالیز ابعادی ارائه کردند که تابعی از حجم آب کاربردی، هدایت هیدرولیکی خاک و مدت زمان سپری شده بعد از پایان آبیاری می‌باشد (۱۱).

$$\pi_1 = q^{a_1} K_s^{b_1} D^1 = (L^3 T^{-1})^{a_1} \cdot (L T^{-1})^{b_1} \cdot L = \begin{cases} a_1 = -0.5 \\ b_1 = 0.5 \end{cases} \quad (۳)$$

$$\pi_2 = q^{a_2} K_s^{b_2} Z^1 = (L^3 T^{-1})^{a_2} \cdot (L T^{-1})^{b_2} \cdot L = \begin{cases} a_2 = -0.5 \\ b_2 = 0.5 \end{cases} \quad (۴)$$

$$\pi_3 = q^{a_3} K_s^{b_3} t^1 = (L^3 T^{-1})^{a_3} \cdot (L T^{-1})^{b_3} \cdot T = \begin{cases} a_3 = -0.5 \\ b_3 = +1.5 \end{cases} \quad (۵)$$

$$\pi_4 = q^{a_4} K_s^{b_4} V^1 = (L^3 T^{-1})^{a_4} \cdot (L T^{-1})^{b_4} \cdot L^3 = \begin{cases} a_4 = -1.5 \\ b_4 = +1.5 \end{cases} \quad (۶)$$

$$t^* = \left(\frac{K_s^{1.5}}{q^{0.5}} \right)^{0.5} \cdot t \quad (۱۳)$$

پس از حل معادله‌ها و تعیین ضرایب a_1 تا a_4 و b_1 تا b_4 ، توان‌های π_1 تا π_4 از رابطه‌های زیر مشخص خواهند شد:

$$V^* = \left(\frac{K_s}{q} \right)^{1.5} \cdot V \quad (۱۴)$$

$$\pi_1 = \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.5} \cdot D \quad (۷)$$

بین پارامترهای بدون بعد می‌توان روابطی برقرار نمود. پس از ترسیم مقادیر عمق (ستاره) و قطر (ستاره) در مقابل حجم (ستاره) ملاحظه شد که می‌توان بین آن‌ها روابطی توانی به شرح زیر برقرار کرد:

$$\pi_2 = \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.5} \cdot Z \quad (۸)$$

$$D^* = \beta_1 \cdot V^{*\alpha_1} \quad (۱۵)$$

$$\pi_3 = \left(\frac{K_s^{1.5}}{q^{0.5}} \right)^{0.5} \cdot t \quad (۹)$$

$$Z^* = \beta_2 \cdot V^{*\alpha_2} \quad (۱۶)$$

$$\pi_4 = \left(\frac{K_s}{q} \right)^{1.5} \cdot V \quad (۱۰)$$

که در آن‌ها، β_1 ، β_2 ، α_1 و α_2 ضرایب ثابت می‌باشند. برای برگردان روابط بدون بعد به شکل ابعادی آن‌ها، باید به جای D و Z مقادیر اصلی (رابطه‌های ۱۱ تا ۱۴) آن‌ها در رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ جایگزین شوند. نمونه‌ای از روند استخراج این رابطه‌ها در بخش نتایج و بحث آورده شده است (رابطه ۱۹).

اعداد π_1 تا π_4 بدون بعد و توابعی از D ، Z و V هستند و به صورت قراردادی با اندیس ستاره از خود آن متغیرها نشان داده می‌شوند. بنابراین این معادله‌ها به صورت زیر تغییر پیدا خواهند کرد:

با استفاده از معادلات به دست آمده توزیع رطوبت در جهت افقی (D) و جهت عمودی (Z) قابل محاسبه (شبیه‌سازی) است. به منظور مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده از شاخص‌های

$$D^* = \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.5} \cdot D \quad (۱۱)$$

$$Z^* = \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.5} \cdot Z \quad (۱۲)$$

قطرهای ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر) از یک مخزن به حجم ۲۵۰ لیتری به قطره‌چکان‌ها منتقل گردید و در داخل مخزن به‌منظور ثابت نگه داشتن آب از یک شناور استفاده می‌شد. همچنین به‌منظور هدایت درست جریان آب در مسیر انتقال آب از شیر فلکه و یک شیر قطع و وصل جریان برای کنترل جریان به داخل هر محفظه استفاده شد. فشارسنجی بر روی سامانه تعبیه شد تا در تمامی آزمایش‌ها فشار ثابت ۲ بار نگه داشته شود. در این پژوهش از سه تیمار بافت خاک سنگین، متوسط و سبک، دو تیمار دبی قطره‌چکان ۲/۴ و ۸ لیتر بر ساعت (به‌ترتیب Q_1 و Q_2) از نوع تنظیم‌شونده نتافیم و دو روش آبیاری قطره‌ای پالسی و پیوسته استفاده شد. مشخصات فیزیکی خاک مورد آزمایش در جدول ۱ ارائه گردیده است. توضیح این‌که در خصوص انتخاب بافت خاک سعی شد که با انتخاب سه بافت سنگین و متوسط و سبک بتوان نتایج پژوهش را به همه بافت‌ها تا حد امکان تعمیم داد و در خصوص انتخاب دبی قطره‌چکان‌ها از آن‌جایی‌که دبی‌های معمول ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت است، یک دبی کم و یک دبی زیاد انتخاب شد ولی در عمل اندازه‌گیری‌ها نشان داد که دبی قطره‌چکان ۲ لیتر بر ساعت، ۲/۴ لیتر بر ساعت می‌باشد که البته چون منظور از اعمال دبی قطره‌چکان مقایسه تأثیر دبی در بافت خاک می‌باشد این اهداف نیز تحقق پیدا کرد. در خصوص نحوه انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که پس از اتمام هر آزمایش خاک هر محفظه بیرون آورده می‌شد تا در معرض نور خورشید قرار گرفته سپس خشک شود و برای آزمایش بعدی مهیا شود. در نهایت وقتی خاک‌ها به‌طور کامل خشک می‌شدند به‌صورت لایه‌لایه به محفظه متناظر اضافه و به اندازه مناسب متراکم می‌شدند. با توجه به این‌که مقدار دبی خروجی قطره‌چکان‌ها کم بود وارد به سامانه یک لوله برگشت جریان مازاد^۱ نیز طراحی گردید.

آماری حداکثر خطا (ME) و میانگین ریشه دوم خطا (RMSE) استفاده گردید که به‌شرح رابطه‌های محاسبه می‌شوند:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (17)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

که در آن، P_i و O_i به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده و N تعداد نمونه‌های به‌کار رفته است. روش انجام آزمایش: این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام شد. در این پژوهش از یک مدل فیزیکی با ابعاد (متر ۱/۲ × متر ۰/۹ × متر ۰/۹) برای شبیه‌سازی حالت آبیاری قطره‌ای در مزرعه استفاده شد (شکل ۱). مدل محفظه شفاف است که به سه قسمت مجزا تفکیک شده است تا امکان انجام هم‌زمان سه آزمایش برای هر سه بافت خاک فراهم باشد. طراحی مدل آزمایشگاهی نیز به‌گونه‌ای است که هر قسمت مربوط به یک نوع بافت خاک است. با توجه به این‌که توزیع افقی آب در خاک‌های سنگین بیش‌تر می‌باشد، محفظه با بیش‌ترین طول (۱/۲ متر) به خاک با بافت سنگین اختصاص داده شد و برای خاک‌های با بافت سبک و متوسط هرکدام محفظه با طول ۰/۹ در نظر گرفته شد. همچنین با آغشته کردن دیواره داخلی مدل به چسب و پراکندن شن بر روی آن یک دیواره تقریباً زبری ایجاد شد تا بتوان از پیدا شدن جریانات ترجیحی در حین انجام آزمایش جلوگیری کرد. هدف از شفاف بودن محفظه برای دیدن جنبه پیشروی رطوبت است. این پژوهش و آزمایش‌ها به‌گونه‌ای طرح شد که تا حدود بسیاری بتواند شرایط واقعی یک سامانه آبیاری قطره‌ای در مزرعه را شبیه‌سازی کند. بدین‌منظور آب به‌وسیله پمپ و از طریق لوله‌های پلی‌اتیلن (لوله اصلی با قطر ۵۰ میلی‌متر و نیمه اصلی و لاترال به‌ترتیب با

طوری تنظیم شد که حجم آب مصرفی با دبی ۲ لیتر بر ساعت یکسان باشد. با مدرج نمودن مدل آزمایشگاهی و ترسیم جبهه رطوبتی بر روی صفحه آن، توزیع جبهه رطوبتی در جهات افقی و عمودی در زمان‌های ذکر شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این آزمایش قطره‌چکان‌ها بر روی سطح خاک قرار گرفتند. برای هر دو روش مدت زمان آبیاری، برای دبی‌های همنام یکسان بود. برای روش پالسی پس از هر یک ساعت آبیاری، یک ساعت استراحت یا قطع آبیاری اعمال شد. در خصوص حجم آب مصرفی نیز زمان آبیاری در دبی ۸ لیتر بر ساعت

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده.

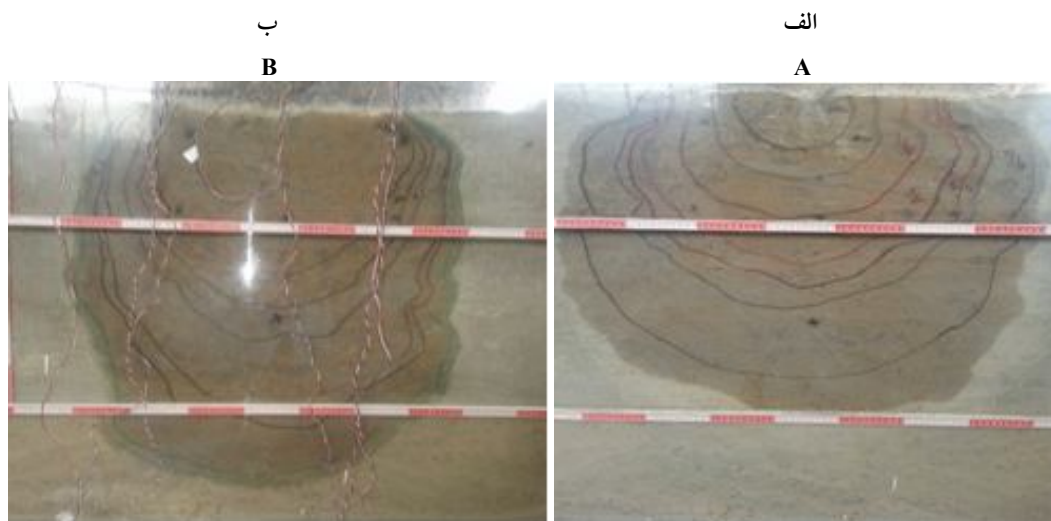
Table 1. The physical properties of soils used.

درصد وزنی رطوبت ظرفیت زراعی (Field Capacity)	بافت خاک (Soil texture)	درصد رس Clay (%)	درصد سیلت Silt (%)	درصد شن Sand (%)	نوع بافت (Type of Soil)
20.4	شنی لوم (Sandy Loam)	18.54	4.86	76.60	سبک (Soft)
23.21	رسی لوم (Clay Loam)	36.46	32.86	30.68	متوسط (Medium)
23.83	رسی (Clay)	41.6	27.86	30.54	سنگین (Heavy)



شکل ۱- نمایی از مدل فیزیکی.

Figure 1. A view of the physical model.



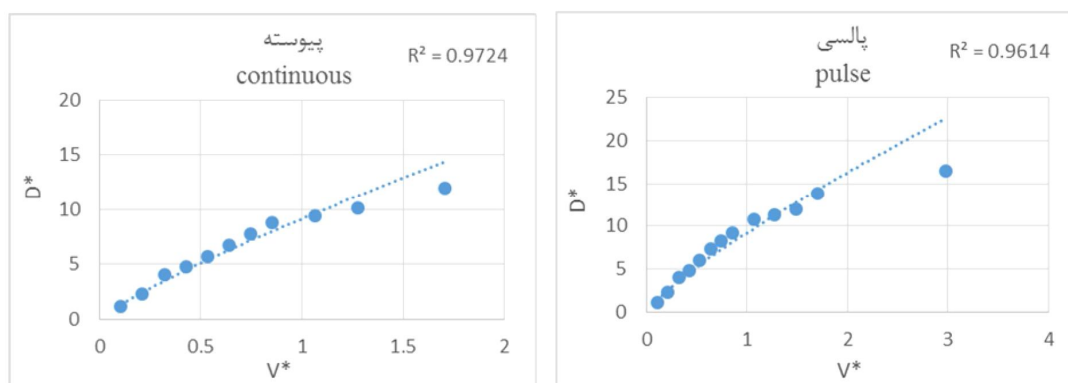
شکل ۲- مقایسه توزیع رطوبت الف- پیوسته و ب- پالسی برای خاک شنی و دبی ۲ لیتر بر ساعت.

Figure 2. Compare Soil moisture distribution A-continuous B-pulse for sandy soil and discharge of 2 l/h.

مقدار برای معادله Z^* و V^* در سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی و پیوسته به ترتیب ۹۷/۵ و ۹۷ درصد می‌باشد. با توجه به معادلات به دست آمده، مقادیر ضرایب β_1 ، β_2 و α_1 و α_2 برای هر دو حالت (جدول ۲) تعیین شدند.

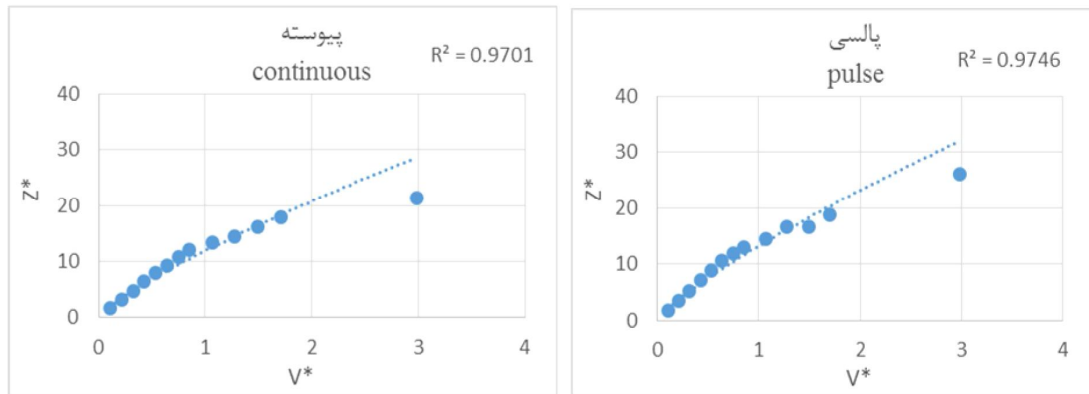
نتایج و بحث

نتایج برازش ضرایب معادله‌های بدون بعد نشان می‌دهد که اعداد بدون بعد همبستگی بالایی دارند. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، ضریب تعیین (R^2) معادله بین D^* و V^* در سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی و پیوسته به ترتیب ۹۶/۱ و ۹۷/۲ درصد می‌باشد و این



شکل ۳- رابطه بین اعداد بدون بعد D^* و V^* در سیستم آبیاری پالسی و پیوسته.

Figure 3. The relationship between dimensionless numbers D^* and V^* in pulsed and continuous irrigation system.



شکل ۴- رابطه بین اعداد بدون بعد V^* و Z^* در سیستم آبیاری پالسی و پیوسته.

Figure 4. The relationship between dimensionless numbers Z^* and V^* in pulsed and continuous irrigation system.

جدول ۲- ضرایب و توان‌های به دست آمده از برازش منحنی‌ها.

Table 2. Factor and can be obtained from the fitted curve.

$D^* = \beta_1 \cdot V^{*\alpha_1} \rightarrow D^* = 9.15 V^{*0.85}$	پیوسته (Continuous)
$Z^* = \beta_2 \cdot V^{*\alpha_2} \rightarrow Z^* = 11.89 V^{*0.8}$	
$D^* = \beta_1 \cdot V^{*\alpha_1} \rightarrow D^* = 9.21 V^{*0.82}$	پالسی (Pulse)
$Z^* = \beta_2 \cdot V^{*\alpha_2} \rightarrow Z^* = 13.22 V^{*0.81}$	

۱۹ به‌عنوان نمونه‌ای از روند تعیین ضرایب و توان‌ها ارائه شده است):

حال با جاگذاری ضرایب و توان‌ها در رابطه‌های قبلی، روابط مربوط به توزیع رطوبت افقی و توزیع رطوبت عمودی به شکل زیر نوشته می‌شوند (رابطه

$$D^* = \beta_1 \cdot V^{*\alpha_1} \xrightarrow{\text{جاگذاری}} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.5} \cdot D = \beta_1 \left(\left(\frac{K_s}{q} \right)^{1.5} \cdot V \right)^{\alpha_1} \xrightarrow{V=q \cdot t} \quad (19)$$

$$D = \beta_1 \cdot K_s^{\left(\frac{3}{2}\alpha_1 - \frac{1}{2} \right)} \cdot q^{\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\alpha_1 \right)} \cdot t^{\alpha_1} \xrightarrow{\beta_1 = 9.15 \ \& \ \alpha_1 = 0.85} D = 9.15 K_s^{0.774} q^{0.0755} t^{0.85}$$

همین‌طور برای حالت‌های دیگر در نهایت خواهیم داشت (جدول ۳):

جدول ۳- معادلات استخراج شده به روش آنالیز ابعادی.

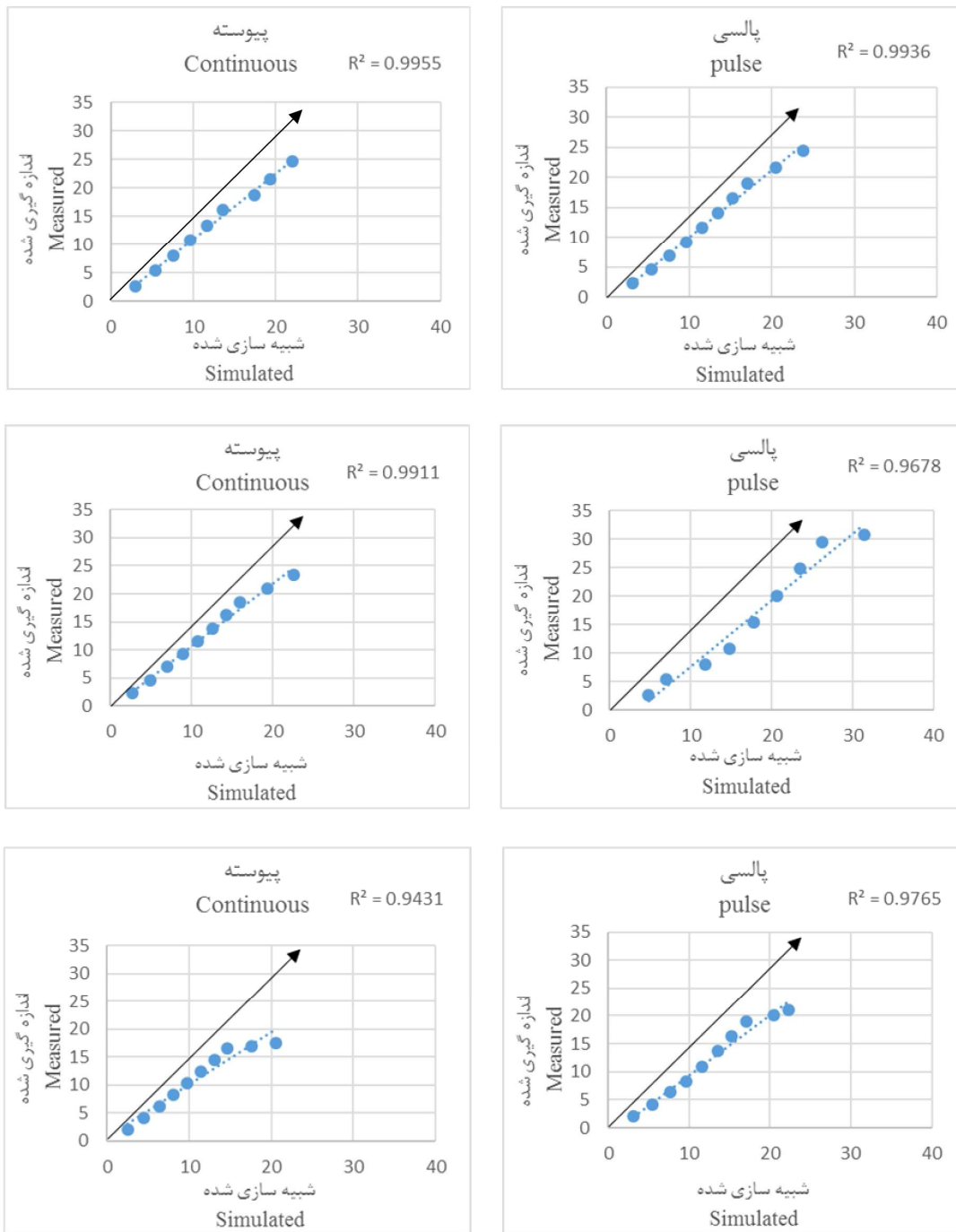
Table 3. The equations derived by dimensional analysis.

$D = 9.15 K_s^{0.774} q^{0.0755} t^{0.85}$	پیوسته (Continuous)
$Z = 11.89 K_s^{0.7} q^{0.1} t^{0.8}$	
$D = 9.21 K_s^{0.73} q^{0.09} t^{0.82}$	پالسی (Pulse)
$Z = 13.22 K_s^{0.715} q^{0.095} t^{0.81}$	

خاک شنی و دبی ۲ لیتر بر ساعت، جریان پالسی و پیوسته هر دو ۰/۹۷ و برای دبی ۸ لیتر به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۷ می‌باشد (شکل‌های ۵ و ۷).

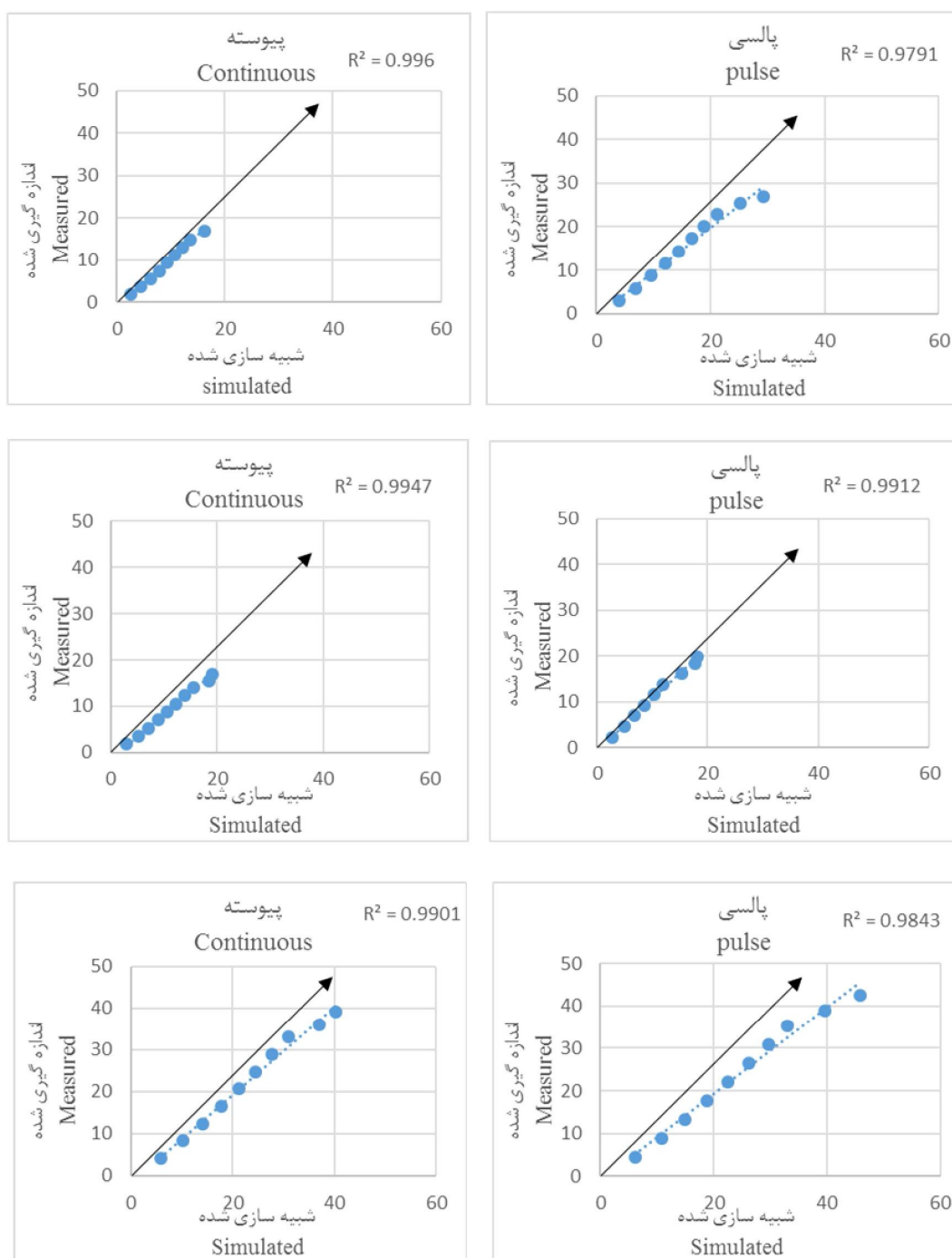
ارزیابی ضرایب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در معادله‌هایی که برای برآورد توزیع رطوبت در جهت عمودی ارائه گردید، نشان داد که این ضریب در خاک رسی برای دبی‌های ۲ و ۸ لیتر بر ساعت برای جریان پالسی ۰/۹۷ و ۰/۹۸ و برای جریان پیوسته هر دو دبی ۰/۹۹ می‌باشد، در خاک لومی برای جریان پالسی به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۸ و نیز برای جریان پیوسته ۰/۹۹ و ۰/۹۸ می‌باشد همچنین برای خاک شنی این مقادیر برای جریان پالسی و پیوسته برای هر دو دبی به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۹ می‌باشد (شکل‌های ۶ و ۸). این نتایج نشان از عملکرد مطلوب معادله‌های ارائه شده برای برآورد توزیع رطوبت در جهت افقی و عمودی می‌باشد.

در این رابطه‌ها، (D) بر حسب سانتی‌متر، (Z) بر حسب سانتی‌متر، (V) بر حسب لیتر، (t) بر حسب دقیقه و (K_s) بر حسب سانتی‌متر بر ساعت می‌باشد. در این پژوهش با توجه به این‌که برای ارائه روابط با استفاده از تحلیل ابعادی از ۳۰ تا ۴۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده و معادلات مربوطه استخراج گردید باید برای ارزیابی معادله‌های برازش داده شده، مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج ارزیابی معادله‌های پیشنهادی در سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی و پیوسته برای توزیع رطوبت در جهت افقی آب نشان داد که ضرایب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در خاک رسی برای دبی‌های ۲ و ۸ لیتر بر ساعت برای جریان پالسی به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۸ و برای جریان پیوسته نیز ۰/۹۹ و ۰/۹۷ می‌باشد، که این مقدار برای خاک لومی برای جریان پالسی ۰/۹۶ و ۰/۹۹ و جریان پیوسته ۰/۹۹ و ۰/۹۷ و همچنین برای



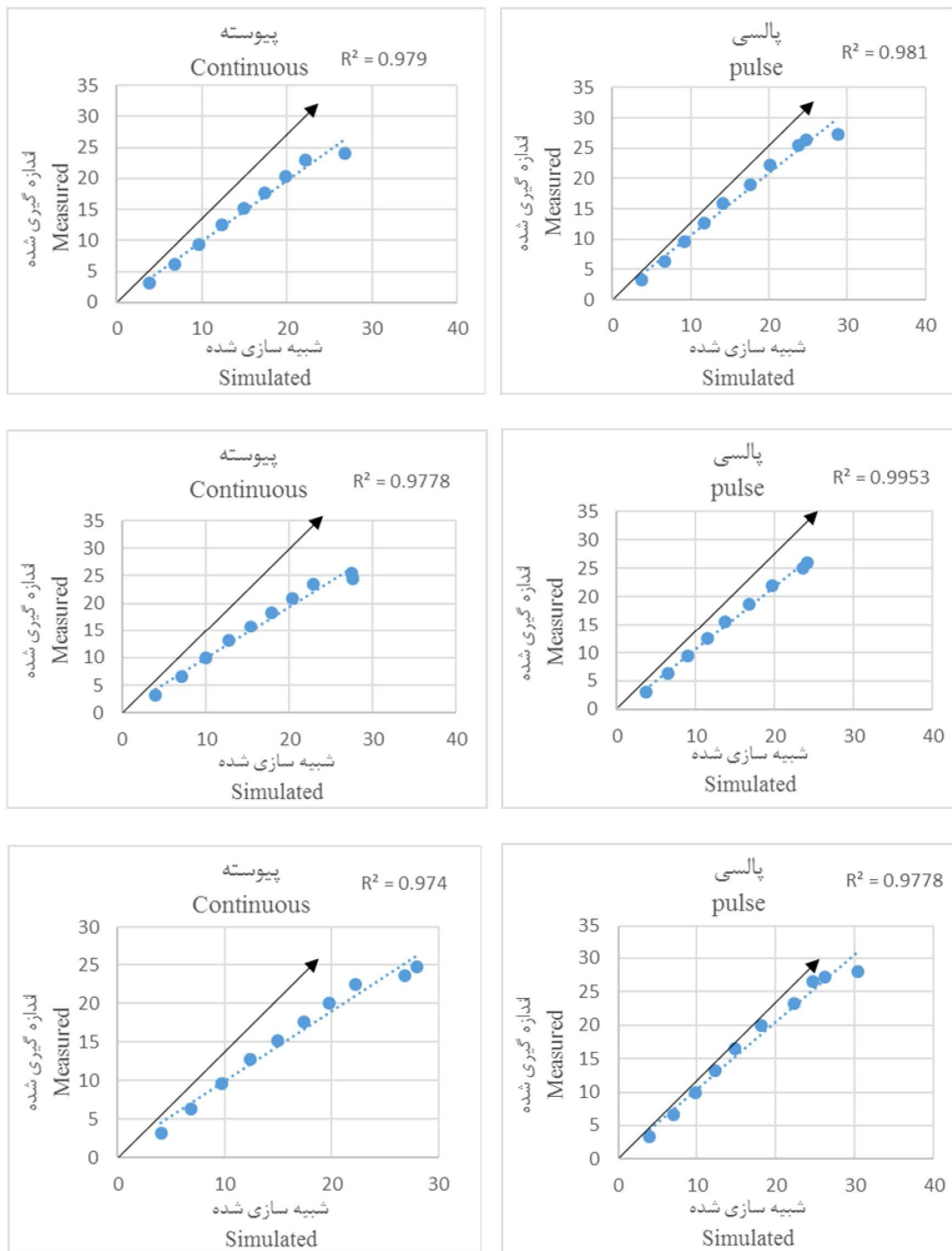
شکل ۵- مقایسه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی خاک مرطوب‌شده در جهت افقی با دبی ۲ لیتر بر ساعت برای حالت پالسی و پیوسته (ردیف بالا، خاک رس ردیف وسط، خاک لومی و ردیف پایین، خاک شنی).

Figure 5. Compare the measured and simulated moist soil in horizontal direction with the flow of 2 l/h for pulsed and continuous mode (Top row, clay soil middle row, loamy soil and bottom row, sandy soil).



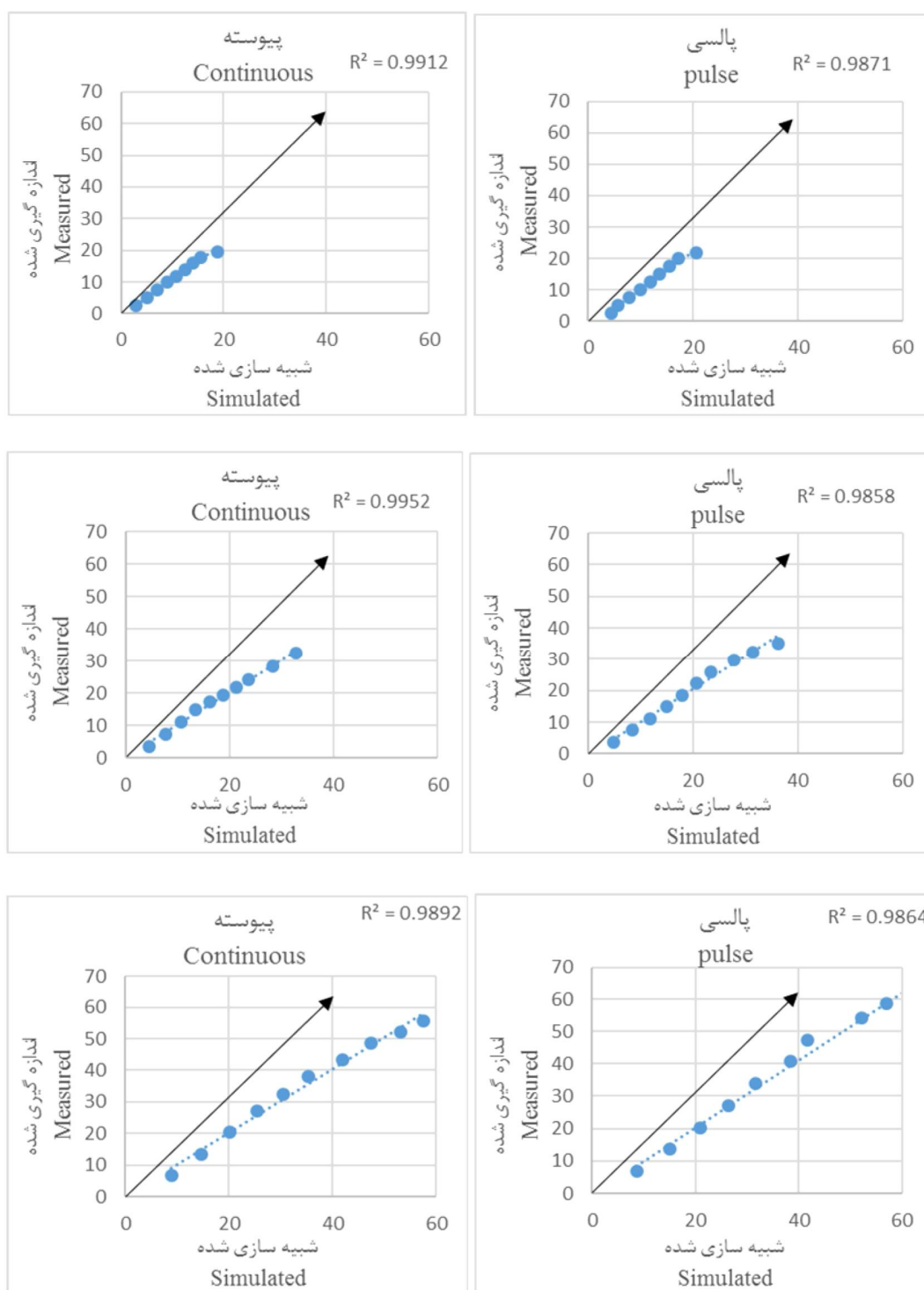
شکل ۶- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده خاک مرطوب شده در جهت عمودی با دبی ۲ لیتر بر ساعت برای حالت پالسی و پیوسته (ردیف بالا، خاک رس ردیف وسط، خاک لوم و ردیف پایین، خاک شن).

Figure 6. Compare the measured and simulated moist soil in vertical direction with the flow of 2 l/h for pulsed and continuous mode (Top row, clay soil middle row, loamy soil and bottom row, sandy soil).



شکل ۷- مقایسه اندازه گیری و شبیه سازی خاک مرطوب شده در جهت افقی با دبی ۸ لیتر بر ساعت برای حالت پالسی و پیوسته (ردیف بالا، خاک رس ردیف وسط، خاک لوم و ردیف پایین، خاک شن).

Figure 7. Compare the measured and simulated moist soil in horizontal direction with the flow of 8 l/h for pulsed and continuous mode (Top row, clay soil middle row, loamy soil and bottom row, sandy soil).



شکل ۸- مقایسه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی خاک مرطوب‌شده در جهت عمودی با دبی ۸ لیتر بر ساعت برای حالت پالسی و پیوسته (ردیف بالا، خاک رس ردیف وسط، خاک لوم و ردیف پایین، خاک شن).

Figure 8. Compare the measured and simulated moist soil in vertical direction with the flow of 8 l/h for pulsed and continuous mode (Top row, clay soil middle row, loamy soil and bottom row, sandy soil).

شاخص‌ها نشان می‌دهد که عملکرد معادله‌های پیشنهادی در سطح مطلوب قرار داشته و نتایج آنها از اعتبار قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشد.

ارزیابی معادلات شبیه‌سازی: برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده توزیع رطوبت در جهت افقی و عمودی از شاخص‌های آماری استفاده شده است (جدول‌های ۴ و ۵). بررسی مقادیر این

جدول ۴- شاخص‌های آماری به منظور ارزیابی معادلات شبیه‌سازی در جهت افقی.

Table 4. Statistical indicators to evaluate the simulation equations in the horizontal direction.

۸ لیتر (8 Liter)		۲ لیتر (2 Liter)		شاخص خطا (Error index)	نوع خاک (Type of soil)
پیوسته (Continuous)	پالسی (Pulse)	پیوسته (Continuous)	پالسی (Pulse)		
0.831	0.98	0.686	1.013	RMSE	رس (Clay)
-0.418	-0.263	-0.11	-0.64	ME	
0.487	0.957	0.632	0.84	RMSE	لوم (Loam)
-0.164	-0.151	0.2	0.11	ME	
1.18	1.717	0.99	1.226	RMSE	شن (Sand)
-0.148	-0.431	0.309	0.375	ME	

جدول ۵- شاخص‌های آماری به منظور ارزیابی معادلات شبیه‌سازی در جهت عمودی.

Table 5. Statistical indicators to evaluate the simulation equations in the Vertical direction.

۸ لیتر (8 Liter)		۲ لیتر (2 Liter)		شاخص خطا (Error index)	نوع خاک (Type of soil)
پیوسته (Continuous)	پالسی (Pulse)	پیوسته (Continuous)	پالسی (Pulse)		
0.704	0.973	1.131	1.678	RMSE	رس (Clay)
0.109	-0.492	-0.601	1.037	ME	
1.061	0.958	0.273	0.696	RMSE	لوم (Loam)
0.329	-0.36	-0.086	-0.149	ME	
0.9	0.96	0.921	1.172	RMSE	شن (Sand)
0.2	-0.246	0.25	0.444	ME	

به منظور تعیین ضرایب و توان‌های معادلات، از روش تحلیل ابعادی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که معادلات حاصل شده قادرند با دقت مناسبی، الگوی خیس‌شدگی را شبیه‌سازی نمایند. کاربرد این معادلات

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارائه معادلاتی به منظور تخمین الگوی خیس‌شدگی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی پیوسته و پالسی انجام پذیرفت.

در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای می‌تواند منجر به بهبود عملکرد این سامانه‌ها گردد. همچنین ارزیابی عملکرد این مدل‌ها توسط پارامترهای آماری خطا نشان می‌دهد که محدوده پارامترهای آماری در محدوده قابل قبولی می‌باشد. شاخص خطا RMSE برای توزیع جبهه پیشروی در جهت عمودی و در روش پالسی از ۱/۶۷۸ تا ۰/۴۴۴ دبی ۲ لیتر بر ساعت و از ۰/۹۷۳ تا ۰/۹۶ برای دبی ۸ لیتر بر ساعت متغیر است. شاخص خطا RMSE در روش پیوسته از ۱/۱۳۱ تا ۰/۹۲۱ برای دبی ۲ لیتر بر ساعت و از ۰/۷۰۴ تا ۰/۹ برای دبی ۸ لیتر بر ساعت متغیر است.

در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای می‌تواند منجر به بهبود عملکرد این سامانه‌ها گردد. همچنین ارزیابی عملکرد این مدل‌ها توسط پارامترهای آماری خطا نشان می‌دهد که محدوده پارامترهای آماری در محدوده قابل قبولی می‌باشد. شاخص خطا RMSE برای توزیع جبهه پیشروی در جهت عمودی و در روش پالسی از

منابع

1. Abbas Palangi, J., and Akhond Ali, A. 2008. A semi-empirical model for estimating the geometry of the wetting front under point source trickle irrigation. *J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Science*. 12: 44. 84-69. (In Persian)
2. Beeson, R.C. 1992. Restricting overhead irrigation to dawn limits growth in container-grown woody ornamentals. *HortScience*. 27: 9. 996-999.
3. Bresler, E. 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrig. Sci*. 1: 13-17.
4. Cook, F.J., Thorburn, P.J., Fitch, P., Charlesworth, P.B., and Bristow, K.L. 2006. Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environ Model Softw*. 21: 1353-1359.
5. Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J., and Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*. 22: 3-4. 143-156.
6. Dirksen, C. 1978. Transient and steady flow from subsurface line sources at constant hydraulic head in anisotropic soil. *Trans. ASAE*. 21: 5. 913-919.
7. Dole, J. 1993. Water and fertilizer rate reduction. *Greenhouse Grower*. 11: 13. 24-28.
8. Elmaloglou, S., and Diamantopoulos, E. 2009. Effects of hysteresis on redistribution of soil moisture and deep percolation at continuous and pulse drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 96: 533-538.
9. Gilley, J.R., and Allred, E.R. 1974. Infiltration and root extraction from subsurface irrigation laterals. *Trans. ASAE*. 17: 5. 927-933.
10. Kandelous, M.M., and Simunek, J. 2010. Comparison of numerical, analytical and empirical models to estimate wetting pattern for surface and subsurface drip irrigation. *Irrig. Sci*. 28: 435-444.
11. Karimi, B., Mirzaie, F., and Sohrabi, T. 2013. Evaluation of Moisture Front Redistribution in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems. *Water-Soil Science*. 23: 3. 183-192. (In Persian)
12. Karmeli, D., and Peri, G. 1974. Basic principles of pulse irrigation. *Irrigation and Drainage Division*. 100: 3. 309-319.
13. Levin, I., and Van Rooyen, F.C. 1977. Soil water flow and distribution in horizontal and vertical directions as influenced by intermittent water application. *Soil Science*. 124: 6. 355-365.
14. Levin, I., Van Rooyen, P.C., and Van Rooyen, F.C. 1979. The effect of discharge rate and intermittent water application by point-source irrigation on the soil moisture distribution pattern. *Soil Science Society of America*. 43: 1. 8-16.
15. Li, J., Zhang, J., and Rao, M. 2004. Wetting Pattern and Nitrogen Distributions Affected by Fertilization Strategies from a Surface Point Source. *Agri. Watermang*. 67: 89-104.
16. Meshkat, M., Warner, R.C., and Workman, S.R. 1999. Modeling of Evaporation Reduction in Drip Irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng*. 125: 6. 315-323.
17. Mirzaei, F., Liaghat, A.M., Sohrabi, T.M., and Omid, M. 2005. Simulation of the wetting front from a linear source in tape irrigation systems. *J. Agric. Engin. Res*. 6: 23. 53-66. (In Persian)

18. Mohamadzade, F., Gheysari, M., and Landi, E. 2015. Development and evaluation of estimation models of wetting pattern of drippers in a sandy soil with high gravel. *J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Science*. 19: 71. 297-287. (In Persian)
19. Mostaghimi, S., and Mitchell, J.K. 1983. Pulsed trickling effect on soil moisture distribution. *Water Resource. Bull.* 19: 4. 605-612.
20. Pitts, D.J., Tsai, Y.J., Obreza, T.A., and Myhre, D.L. 1991. Flooding and drip irrigation frequency effects on tomatoes in South Florida. *Trans. American Society of Agricultural Engineers*. 34: 3. 865-870.
21. Philip, J.R. 1991. Effects of root and sub irrigation depth on evaporation and percolation losses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1520-1523.
22. Thorburn, P.J., Cook, F.J., and Bristow, K.L. 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: Implications for system design and management. *Irrig. Sci.* 22: 121-127.



Simulation of soil moisture distribution under drip irrigation pulsed and continuous in dimensional analysis method

***A. Mohammadbeigi¹, F. Mirzaei² and N. Ashraf²**

¹M.Sc. Student, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran,

²Associate Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran

Received: 09/29/2015; Accepted: 10/03/2016

Abstract

Background and Objectives: In recent decades, drip irrigation to reduce applied water, increasing yield and better distribution of fertilizer have been considered. In drip irrigation the soil around root zone of plants is moistened instead of whole soil surface which resulted in reducing applied water. Pulse irrigation is a series of cycles, each cycle of an irrigation phase and a resting phase is formed. Water Alternating used in drip irrigation due to completed the wetting front with less water than a continuous stream. Pulse drip irrigation with good management, have great potential to improve the uniformity distribution of water in the soil and association with rise uptake by plant roots.

Materials and Methods: In this study, using a physical model to simulate the condition of drip irrigation was used on the farm. Three soil textures including heavy, medium and light and two discharge of dripper 2.4 and 8 liter per hour (respectively Q_1 and Q_2) and two pulse and continuous drip irrigation method was used. In addition, by using one of the proposed methods of simulation water movement in soil, means dimensional analyses and by using Buckingham π theorem to obtain Dimensionless numbers with communication between them to get some equation which allow to estimate moisture distribution, progressive front pattern and manner of distribution in wet soil. Finally, in order to compare simulated and measured values of statistical indicators maximum error (ME) and root mean square error (RMSE) was used.

Results: The results showed that the horizontal component of moisture in clay, loam and sand soils are 33, 30 and 20.5 respectively and are more than in pulse method (28, 26 and 18.6 respectively). Vertical component of moisture in discharge of dripper 2.4 L/h in pulse method (for clay, loam and sand are 21.2, 27 and 50 respectively) was more than the continuous method (19, 22 and 43 respectively) for all soils. By comparing the distribution of moisture in the horizontal direction indicates the horizontal component of moist soil for both pulsed and continuous in 8 L/h is more than 2.4 L/h. Increase of moisture in the vertical and horizontal components can be argued that the use of intermittent irrigation water in drip irrigation makes up the wetting front with less water than continuous stream was completed. As well as by use of dimensional analysis for simulation water distribution around emitters for both pulse and continuous irrigation, equations was obtained.

Conclusion: Assessment by statistical indices show that the proposed equations were desirable and their results are of considerable reputation.

Keywords: Dimensional analysis, Moisture distribution, Pulse drip irrigation, Wetting front simulation

* Corresponding Author; Email: a.mohammadbeigi@ut.ac.ir