

استخراج روابط تخمین سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با کمک آنالیز ابعادی

بختیار کریمی^{۱*}، تیمور سهرابی^۲، فرهاد میرزایی^۳ و بهنام آبابایی^۴

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۳۱

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج

۲ و ۳- به ترتیب، استاد و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج

۴- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Bakhtiar.karimi@Gmail.com

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در طراحی و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی که تأثیر قابل توجهی در عملکرد بهینه سیستم و افزایش کارایی مصرف آب دارد، تخمین سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در خاک می‌باشد. در این مطالعه، به کمک قضیه π باکینگهام و با استفاده از آنالیز ابعادی، روابطی به منظور تخمین سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در سه جهت افقی، عمودی (رو به پائین) و عمودی (رو به بالا) ارائه گردید. آزمایش‌ها در یک مدل پلکسی‌گلاس شفاف با ابعاد $3m \times 1/22m \times 0/5m$ و بر روی سه نوع بافت (متوسط، سنگین و سبک) به انجام رسید. قطره‌چکان‌ها در چهار عمق صفر (سطحی)، $H_1 = 15cm$ ، $H_2 = 30cm$ و $H_3 = 45cm$ مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این تحقیق تیمارهای دبی قطره‌چکان‌ها با مقادیر $Q_1 = 2/4$ ، $Q_2 = 4$ و $Q_3 = 6$ لیتر در ساعت اعمال گردید و زمان آبیاری ۶ ساعت در نظر گرفته شدند. نتایج مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نشان دادند که این مدل‌ها با دقت بالایی سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در خاک را در جهات مختلف پیش‌بینی می‌کنند. متوسط مقادیر شاخص خطای استاندارد (SE) در تمامی عمق‌ها و تمامی جهات (افقی و عمودی) برای بافت‌های رسی، لومی و شنی به ترتیب برابر با $0/21$ ، $0/18$ و $0/23$ برآورد گردید که نشان از برتری نسبی معادلات در شبیه‌سازی سرعت حرکت جبهه رطوبتی در خاک‌های رسی می‌باشد. همچنین، متوسط مقادیر این شاخص در عمق‌های مختلف (به ترتیب، $0/28$ ، $0/20$ ، $0/23$ و $0/15$) نشان از افزایش نسبی دقت معادلات هم‌زمان با افزایش عمق می‌باشد. استفاده از این معادلات در طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم‌ها منجر گردد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، الگوی توزیع رطوبت، جبهه رطوبتی، سرعت پیشروی، مدیریت آبیاری

Developing Equations to Estimate the Advance Velocity of the Wetting Front in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems by Dimensional Analysis

B Karimi^{1*}, T Sohrabi², F Mirzaei³ and B Ababaei⁴

Received: 15 June 2013; Accepted: 21 June 2014

1. Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2,3. Professor and Assoc. Prof., respectively, Dept. of Irrig. and Reclamation Engin, Univ. of Tehran, Karaj, Iran

4. Young Researchers Club and Elites, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding Author, Email: Bakhtiar.karimi@gmail.com

Abstract

One of the most important parameters in designing surface and subsurface drip irrigation systems is the advance velocity of the wetting (moisture) front in soil, which enormously affects the performance of these systems. In this study, experiments were carried out in a transparent plexy-glass tank (0.5m*1.22m*3m) using three different soil textures (fine, heavy and medium). The drippers were installed at 4 different soil depths (surface, 15cm, 30cm and 45cm). The emitter outflows were considered 2.4, 4 and 6 lit/hr with irrigation duration of 6 hr. Then, using the- π theorem of Buckingham and Dimensional Analysis, equations were developed to estimate the advance velocity of the wetting front (horizontal, downward and upward). The results of the comparisons between the simulated and measured values showed that these equations were very capable of predicting the advance velocity of the wetting front in different directions. The average Standard Error (SE) values at all depths and in all directions (horizontal and vertical) for clay, loam and sandy soil textures were estimated as 0.18, 0.21 and 0.23, respectively which were the evidence for the relative superiority of the developed equations in clay soil texture. Also, the average SE values at all depths and in all soil textures (0.28, 0.20, 0.23 and 0.15, respectively) showed the increase of equation accuracy with the increase of soil depth. Using these equations in designing surface and subsurface drip irrigation systems could improve system performance.

Keywords: Advance velocity, Drip irrigation, Irrigation management, Moisture distribution pattern, Moisture front

رسیده، اما هنوز مطالعه جامع و کاملی به منظور تخمین سرعت پیشروی آب در خاک صورت نگرفته است. گلدبرگ و ریمون (۱۹۷۶) سه فاکتور خصوصیات خاک، دبی و حجم آب کاربردی را در الگوی خیس‌شدگی تحت آبیاری قطره‌ای موثر دانستند. مشکات و همکاران

مقدمه

از جمله پارامترهای مهم برای طراحی و برنامه‌ریزی مناسب سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، شبیه‌سازی توزیع جبهه حرکت آب در خاک می‌باشد. مطالعات زیادی در این زمینه به انجام

شده نشان داد که مدل عددی HYDRUS نسبت به دیگر روش‌ها دارای خطای کمتری بود. ضریب همبستگی مدل HYDRUS بیش از ۹۵ درصد برآورد گردید، در حالیکه در مدل‌های دیگر، در برخی تیمارها ضریب همبستگی ۹۰ درصد حاصل شد. لازارویچ و همکاران (۲۰۰۷) روش تحلیلی گشتاور را برای تخمین زمانی و مکانی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی پیشنهاد دادند. هدف از مطالعه حاضر، توسعه روابط ریاضی با استفاده از روش آنالیز ابعادی برای تخمین سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تئوری آنالیز ابعادی

یکی از قضایای مهم آنالیز ابعادی در مکانیک سیالات، قضیه π باکینگهام می‌باشد. این قضیه بیان می‌کند که اگر n متغیر بعددار در یک معادله همگن ابعادی وجود داشته باشد که به وسیله m متغیر توصیف شوند، می‌توان آنها را به $n-m$ گروه بدون بعد تقسیم کرد. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق عمق و قطر خاک خیس شده، دبی خروجی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی خاک، حجم آب نفوذ یافته، زمان آبیاری، سرعت ظاهری حرکت آب در خاک در زمان آبیاری بود که با استفاده از قضیه بالا به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$f(q, K_s, V, t, v) = 0 \quad [1]$$

در معادله ۱، متغیرهای بعددار دبی خروجی قطره‌چکان (q)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s)، حجم آب نفوذ یافته (V)، زمان (t) و سرعت ظاهری آب در خاک (v) و متغیرهای اصلی L (طول) و T (زمان) هستند که در نتیجه آن $n-m=3$ عدد بدون بعد حاصل شد. اگر π_i نشان‌دهنده معادلات بدون بعد متغیرهای q ، K_s ، V ، t باشد، معادله ۱ را می‌توان به شکل معادله ۲ نوشت:

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

(۱۹۹۹) یکی از راه‌های موثر برای بهینه‌کردن برنامه‌ریزی آبیاری را استفاده از حل عددی معادلات جریان برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک بیان کردند. کوک و همکاران (۲۰۰۶) دو مدل Wet up و HYDRUS را به منظور تخمین توزیع جبهه رطوبتی (افقی و عمودی) در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی مقایسه کردند و دریافتند که مدل عددی HYDRUS پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به مدل تحلیلی Wet up داشت، چراکه در مدل تحلیلی، فرضیاتی برای حل معادله بکار رفته است که باعث می‌گردد نتایج آن با نتایج واقعی اختلاف زیادی داشته باشد. شوارتز و زور (۱۹۸۶) توزیع پیاز رطوبتی را با در نظر گرفتن هدایت هیدرولیکی خاک، دبی قطره‌چکان و مقدار آب بکار رفته مورد ارزیابی قرار دادند و راهکارهای مدیریتی مختلف متناسب با آن ارائه گردید. میرزایی و همکاران (۱۳۸۴) به منظور شبیه‌سازی جبهه رطوبتی، روابطی را با دخالت دادن عوامل فیزیکی موثر بر حجم خاک مرطوب شده در زیر منبع تغذیه خطی و با استفاده از قضیه π باکینگهام و آنالیز ابعادی بدست آوردند. روابط استخراج شده با داده‌های اندازه‌گیری شده واسنجی شد و در نهایت روابط علمیتجربی بدست آمد که هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایش‌ها نشان می‌داد. معادلات ارائه شده در این پژوهش تابعی از زمان بودند که در هر زمان امکان محاسبه قطر و عمق خاک خیس شده را ارائه داد. لی و همکاران (۲۰۰۴) توزیع جبهه رطوبتی را در آبیاری قطره‌ای برای دو نوع خاک لوم و شن مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که می‌توان شکل توزیع جبهه رطوبتی را برای آبیاری قطره‌ای به صورت توابع نمایی نشان داد و همچنین به این نتیجه رسیدند که افزایش دبی باعث گسترش بیشتر جبهه رطوبتی در جهت افقی و کاهش دبی باعث گسترده‌تری عمیق جبهه پیشروی می‌شود. کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) مدل تحلیلی Wet up و مدل عددی HYDRUS و مدل‌های تجربی شوارتزمن و کندلوس و امین را برای تخمین الگوی جبهه رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای مقایسه کردند. نتایج حاصل از مقایسه مقادیر مشاهده شده و اندازه‌گیری

$$v^* = \left(\frac{1}{K_s} \right) \cdot v \quad [۹]$$

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

$$t^* = \left(\frac{K_s^{1.5}}{q^{0.5}} \right) \cdot t \quad [۱۱]$$

با برقراری روابطی بین پارامترهای بدون بعد، ضرایب این معادلات از رابطه ۱۲ مشخص می‌شوند:

$$v^* = m_1 \cdot V^{*n_1} \quad [۱۲]$$

در این معادله، ml و nl ضرایب ثابت می‌باشند. برای برگرداندن روابط بدون بعد به شکل ابعادی آن، بایستی بجای v^* مقادیر آنها جایگزین شوند. همچنین با توجه به اینکه سرعت حرکت آب در خاک (v^*) در جهت عمودی (vv) و افقی (vh) به طور جداگانه قابل بررسی است، پس ضرایب معادلات به طور جداگانه محاسبه و معادلات متفاوتی برازش گردید.

با توجه به اینکه در سیستم آبیاری زیرسطحی هم پیاز رطوبتی بالای قطره‌چکان و هم پیاز رطوبتی پایین قطره‌چکان مد نظر می‌باشد، پس در سیستم آبیاری زیرسطحی بایستی معادلات به دو قسمت تفکیک شوند و ضرایب معادلات به طور جداگانه محاسبه شوند. معادلات مربوط به قسمت بالایی پیاز رطوبتی به شکل معادله ۱۳ می‌باشد:

$$v_{up}^* = i_1 \cdot V^{*j_1} \quad [۱۳]$$

در این معادله، il و jl ضرایب ثابت می‌باشند. برای برگرداندن روابط بدون بعد به شکل ابعادی آن، بایستی بجای v^*_{up} مقادیر آنها جایگزین شود. با در نظر گرفتن معادلات بالا و برازش روابطی بین اعداد بدون بعد، ضرایب معادلات (il ، ml و jl) بدون بعد برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بطور جداگانه محاسبه شدند. از ۷۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده جهت استخراج ضرایب معادلات استفاده شد و ۳۰ درصد بقیه داده‌های اندازه‌گیری شده برای ارزیابی روابط استخراج شده مورد استفاده قرار

برای تعیین پارامترهای هر یک از اعداد بدون بعد π ، از دو متغیر تکراری همراه با یک متغیر غیرتکراری استفاده شد. روابط ۳ تا ۵ معادلات بی‌بعد حاصل را نشان می‌دهند.

$$\pi_1 = q^{a_1} K_s^{b_1} v^1 = \quad [۳]$$

$$(L^3 T^{-1})^{a_1} \cdot (L T^{-1})^{b_1} \cdot L T^{-1} \Rightarrow \begin{cases} a_1 = 0 \\ b_1 = -1 \end{cases}$$

$$\pi_2 = q^{a_2} K_s^{b_2} V^1 = \quad [۴]$$

$$(L^3 T^{-1})^{a_2} \cdot (L T^{-1})^{b_2} \cdot L^3 \Rightarrow \begin{cases} a_2 = -1.5 \\ b_2 = +1.5 \end{cases}$$

$$\pi_3 = q^{a_3} K_s^{b_3} t^1 = \quad [۵]$$

$$(L^3 T^{-1})^{a_3} \cdot (L T^{-1})^{b_3} \cdot T \Rightarrow \begin{cases} a_3 = -0.5 \\ b_3 = +1.5 \end{cases}$$

در این معادلات، دبی قطره‌چکان و هدایت هیدرولیکی به عنوان متغیرهای تکراری و حجم آب نفوذ یافته، زمان آبیاری و سرعت ظاهری حرکت آب در خاک به عنوان متغیرهای غیر تکراری محسوب می‌شوند. در این معادلات توان‌ها باید به گونه‌ای تعیین شوند که هر π ، بدون بعد باشد و توان هادرسمت چپ معادلات برابر صفر در نظر گرفته شود. به بیان دیگر، باید دو طرف معادلات ۳ تا ۵ از لحاظ ابعادی برابر شوند. پس از حل معادلات و تعیین مقادیر a و b ، روابط نهایی به صورت معادلات ۶ تا ۸ نوشته می‌شوند:

$$\pi_1 = \left(\frac{1}{K_s} \right) \cdot v \quad [۶]$$

$$\pi_2 = \left(\frac{K_s}{q} \right)^{1.5} \cdot V \quad [۷]$$

$$\pi_3 = \left(\frac{K_s^{1.5}}{q^{0.5}} \right) \cdot t \quad [۸]$$

اعداد π ، بدون بعد و به ترتیب توابعی از v ، V و t هستند که به طور قراردادی با اندیس ستاره از خود آن متغیرها نشان داده شد. بنابراین معادلات ۶ تا ۸ به شکل معادلات ۹ تا ۱۱ تغییر پیدا می‌کنند:

لوله‌های اصلی، نیمه اصلی و فرعی به ترتیب ۵۰، ۲۰ و ۱۶ میلی متر بود. در این تحقیق از سه نوع بافت متوسط، سنگین و سبک استفاده گردید (جدول ۱). طراحی مدل آزمایشگاهی به گونه‌ای انجام گرفت که هر قسمت مربوط به یک نوع خاک باشد. با توجه به اینکه توزیع افقی آب در خاک‌های سنگین بیشتر است، محفظه مربوط به خاک سنگین (۱/۲ متر) بزرگتر از خاک‌های با بافت سبک و متوسط (هر کدام ۰/۹ متر) طراحی شد (شکل ۱). قطره‌چکان‌های مورد ارزیابی شامل سویس دریپ و نتافیم بود که در چهار عمق صفر (سطحی)، ۱۵ cm (H1)، ۲۰ cm (H2) و ۴۵ cm (H3) نصب شدند. دبی‌های اعمال شده ۲/۴ (Q1)، ۴ (Q2)، ۶ (Q3) لیتر در ساعت بود. در این تحقیق با ترسیم جبهه حرکت آب بر روی صفحه شفاف پلکسی‌گلاس در زمان‌های مختلف، سرعت پیشروی محاسبه گردید (با داشتن مسافت طی شده در جهت افقی، عمودی و عمودی (رو به بالا) و همچنین زمان طی شده، سرعت پیشروی اندازه‌گیری شد). در پایان هر آزمایش (مدت آبیاری ۶ ساعت) با تهیه عکسی از بدنه پلکسی‌گلاس و به کمک نرم افزار Grapher جبهه رطوبتی ترسیم شده در زمان‌های مختلف رقومی شد. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، در شرایط آزمایشگاهی و به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد.

گرفت. به منظور ارزیابی معادلات بدست آمده، از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (R)، خطای استاندارد (SE) و شیب خط برازش یافته بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده (B) استفاده شد که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

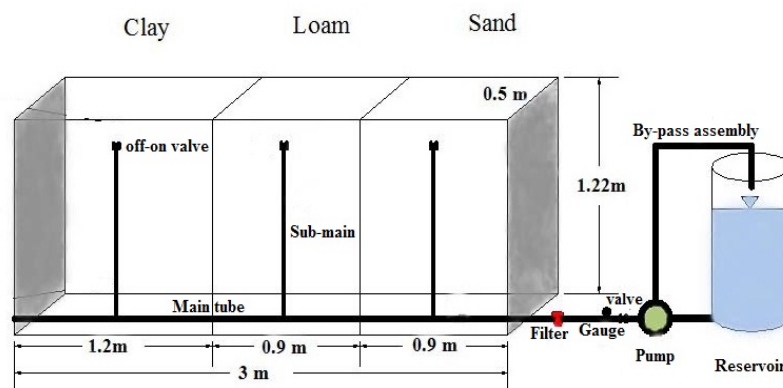
$$R = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad [14]$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left[\sum(y - \bar{y})^2 - \frac{[\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})]^2}{\sum(x - \bar{x})^2} \right]} \quad [15]$$

$$B = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2} \quad [16]$$

روش انجام آزمایش

در این پژوهش که در سال ۱۳۹۱ در آزمایشگاه مرکزی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به انجام رسید، برای انجام آزمایش‌های عملی و اندازه‌گیری‌ها، یک مدل فیزیکی از جنس پلکسی‌گلاس با ابعاد $۳m \times ۱/۲۲m \times ۰/۵m$ ساخته شد. مدل به سه قسمت مجزا تفکیک شد و امکان انجام همزمان سه آزمایش فراهم شد. در این تحقیق از یک منبع ۲۵۰ لیتری استفاده گردید و همچنین به دلیل تعداد کم قطره‌چکان‌ها از سیستم کاهنده فشار (بای‌پس) استفاده گردید و در کلیه آزمایش‌ها فشار سیستم رو ۲ اتمسفر تنظیم گردید. قطر



شکل ۱- لایسیمتر آزمایشگاهی و اتصالات مربوط برای انجام آزمایش‌ها.

هر سه نوع خاک در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، ضریب این معادله برای سیستم آبیاری سطحی ۲/۲۴۳

نتایج و بحث

شکل ۲ نتایج حاصل از برازش بهترین منحنی توانی بر مقادیر سرعت افقی و حجم آب نفوذ یافته در

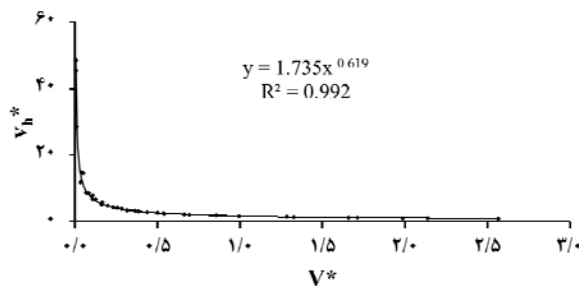
که در تمامی این روابط، دقت برازش (ضریب تبیین) قابل توجه بوده و این می‌تواند در ارائه روابطی دقیق حائز اهمیت باشد. شکل ۴ ضرایب مربوط به سرعت خیز جبهه حرکت آب به سمت بالا را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴، ضریب معادله برای سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (برای اعماق نصب مختلف) ۱/۳۸۲، توان معادله ۰/۶- و ضریب تبیین ۰/۹۸۹ حاصل شد که این ضرایب در معادلات اصلی مربوط به سرعت خیز جبهه حرکت آب به سمت بالا (v_{up}) جاگذاری گردید.

توان معادله ۰/۶۵- و ضریب تبیین (R^2) ۰/۹۴۹ به دست آمد و برای سیستم آبیاری زیرسطحی ضریب معادله ۱/۷۳۵، توان معادله ۰/۶۱- و ضریب تبیین ۰/۹۹۱ برآورد شد. شکل ۳ نتایج مربوط به سرعت عمودی جبهه حرکت آب (رو به پایین) را نشان می‌دهد. ضریب معادله، توان معادله و ضریب تبیین در این حالت برای سیستم آبیاری سطحی به ترتیب ۱/۶۷۲، ۰/۵۵- و ۰/۹۸۶ و برای سیستم آبیاری زیرسطحی ۱/۶۳۵، ۰/۶- و ۰/۹۶۶ (به ترتیب) بود. نکته قابل توجه در برازش بین اعداد بدون بعد این است

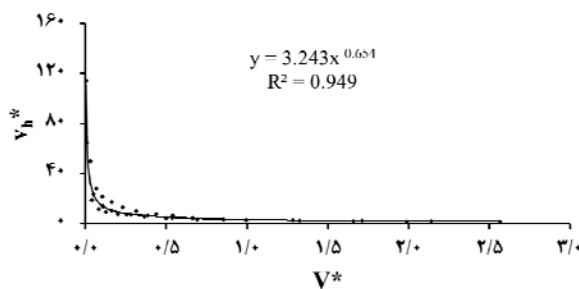
جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده.

درصد رطوبت وزنی اشباع (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع (m/hr)	چگالی حقیقی (gr/cm ³)	چگالی ظاهری (gr/cm ³)	بافت خاک	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک
۳۷/۵	۰/۰۶۲۵	۲/۶۵	۱/۲	رسی - شنی	۳۶	۱۸	۴۶	سنگین
۳۴/۵	۰/۰۹۳۶	۲/۶۵	۱/۳۵	لومرسی شنی	۲۳	۲۲	۵۵	متوسط
۳۰/۱	۰/۱۳۳۱	۲/۵۹	۱/۴۵	شنی لومی	۱۱	۱۳	۷۶	سبک

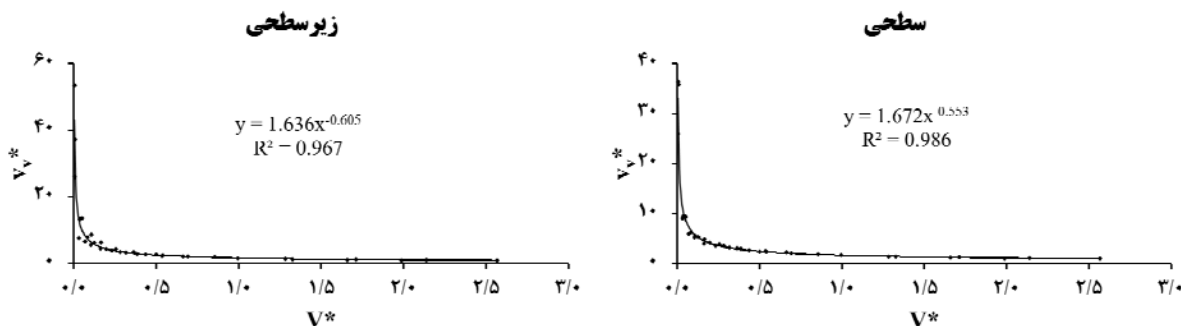
زیرسطحی



سطحی

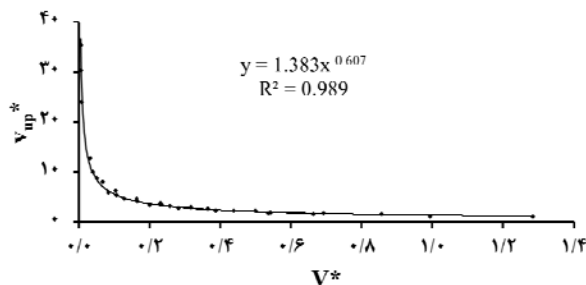


شکل ۲- برازش رابطه بین اعداد بدون بعد V_v^* و V^* در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی.



شکل ۳- برآزش رابطه بین اعداد بدون بعد V^* و V_v^* در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی.

زیر سطحی (اعماق نصب مختلف)



شکل ۴- برآزش رابطه بین اعداد بدون بعد V^* و V_{up}^* در سیستم آبیاری زیر سطحی.

بر حسب دقیقه، دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها (q) بر حسب لیتر در ساعت، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) بر حسب متر بر ساعت و سرعت حرکت آب (در هر سه جهت) در خاک بر حسب سانتی‌متر در دقیقه می‌باشد.

با جاگذاری ضرایب بالا در معادلات قبلی، روابط اصلی مربوط به سرعت ظاهری جبهه حرکت افقی، عمودی و حرکت به سمت بالا محاسبه شد. روند تعیین ضرائب و توان‌ها در معادله ۱۷ به عنوان نمونه به طور کامل ارائه شده است. در این معادلات، زمان آبیاری (t)

$$v_h^* = m_4 \cdot V^{*n_4} \xrightarrow{\text{replacement}} \left(\frac{1}{K_s} \right) \cdot v_h = m_4 \cdot \left(\left(\frac{K_s}{q} \right)^{1.5} \cdot V \right)^{n_4} \xrightarrow{V=q \cdot t} \quad \text{سطحی [۱۷]}$$

$$v_h = m_4 K_s^{(1.5n_4+1)} q^{(-0.5n_4)} t^{n_4} \xrightarrow{m_4=3.243, n_4=-0.65} v_h = 3.243 K_s^{0.025} q^{0.325} t^{-0.65}$$

$$v_h = 1.735 K_s^{0.085} q^{0.305} t^{-0.61} \quad \text{زیر سطحی [۱۸]}$$

$$v_v = 1.672 K_s^{0.175} q^{0.275} t^{-0.55} \quad \text{سطحی [۱۹]}$$

$$v_v = 1.635 K_s^{0.100} q^{0.300} t^{-0.60} \quad \text{زیر سطحی [۲۰]}$$

$$v_{up} = 1.382 K_s^{0.100} q^{0.300} t^{-0.60} \quad \text{همه عمق‌ها [۲۱]}$$

عملکرد معادلات در هر سه بافت نزدیک به یکدیگر بوده است. هرچند که با توجه به شاخص B ، برآورد معادلات در خاک رسی، تا حدودی دست‌بالا و در خاک‌های لومی

جدول ۲، آماره‌های عملکرد مدل در بافت‌های مختلف خاک را نشان می‌دهد. متوسط مقادیر شاخص‌ها نشان می‌دهند که در ارتباط با سرعت حرکت افقی،

مقادیر شاخص SE در تمامی عمق‌ها و تمامی جهات (افقی و عمودی) برای بافت‌های رسی، لومی و شنی به ترتیب برابر با ۰/۱۸، ۰/۲۱ و ۰/۲۳ برآورد گردید که نشان از برتری معادلات در شبیه‌سازی سرعت حرکت جبههٔ رطوبتی در خاک‌های شنی می‌باشد. همچنین، متوسط مقادیر شاخص SE در عمق‌های مختلف (به ترتیب، ۰/۲۸، ۰/۲۰، ۰/۲۳ و ۰/۱۵) نشان از افزایش نسبی دقت معادلات همزمان با افزایش عمق می‌باشند.

و شنی، تا حدودی دست‌پایین می‌باشند. در ارتباط با حرکت عمودی به سمت پایین، بهترین عملکرد (به ترتیب) از نظر شاخص SE ، مربوط به خاک لومی و رسی بوده و در خاک شنی، معادلات به برآوردهای دست‌پایین‌تری منجر شده‌اند. در مورد سرعت حرکت عمودی به سمت بالا، بهترین عملکردها (به ترتیب) مربوط به خاک‌های رسی و شنی بوده و در خاک لومی، معادلات به برآوردهای دست‌پایین‌تری منجر شده‌اند. متوسط

جدول ۲- آماره‌های عملکرد مدل در بافت‌های مختلف خاک.

بافت خاک	عمق نصب (cm)	سرعت حرکت عمودی رو به پایین (cm/min)			سرعت حرکت عمودی رو به پایین (cm/min)			سرعت حرکت افقی (cm/min)		
		B	SE	R	B	SE	R	B	SE	R
رسی	سطحی	---	---	---	۱/۰۹	۰/۱۵	۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۴۱	۰/۹۶
	۱۵	۰/۸۷	۰/۱۲	۰/۹۷	۱/۰۲	۰/۲۵	۰/۹۲	۱/۰۰	۰/۱۲	۰/۹۹
	۳۰	۰/۸۸	۰/۲۸	۰/۸۷	۰/۷۱	۰/۰۹	۰/۹۸	۰/۸۳	۰/۲۲	۰/۹۳
	۴۵	۰/۵۴	۰/۱۵	۰/۹۰	۰/۷۲	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۱۶	۰/۹۷
	سطحی	---	---	---	۱/۱۵	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۲۰	۰/۹۹
	۱۵	۱/۶۳	۰/۳۱	۰/۹۷	۱/۰۵	۰/۱۴	۰/۹۸	۱/۳۲	۰/۲۶	۰/۹۶
لومی	۳۰	۰/۹۱	۰/۲۷	۰/۸۹	۰/۹۷	۰/۱۲	۰/۹۸	۱/۲۵	۰/۴۷	۰/۸۸
	۴۵	۰/۶۸	۰/۲۰	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۱۴	۰/۹۷	۱/۰۴	۰/۱۲	۰/۹۹
	سطحی	---	---	---	۱/۸۹	۰/۳۹	۰/۹۳	۱/۱۸	۰/۴۴	۰/۹۷
	۱۵	۱/۰۹	۰/۲۲	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۱۴	۰/۹۷	۱/۰۱	۰/۱۹	۰/۹۷
	۳۰	۱/۰۷	۰/۱۷	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۲۳	۰/۹۴	۱/۰۸	۰/۲۴	۰/۹۵
	۴۵	۰/۷۸	۰/۱۵	۰/۹۵	۱/۱۴	۰/۲۵	۰/۹۵	۰/۸۰	۰/۱۱	۰/۹۸

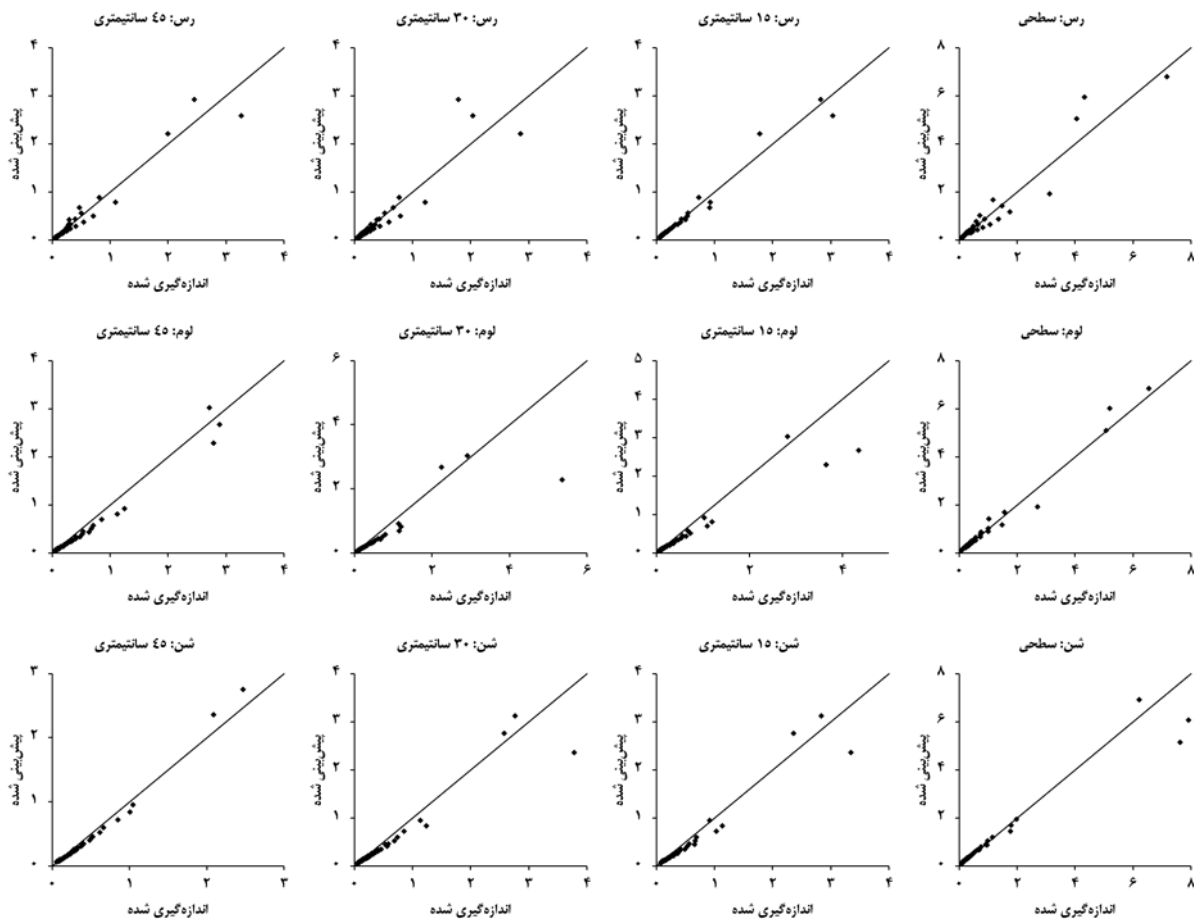
شده و شبیه‌سازی شده در معادلاتی که برای برآورد سرعت عمودی (رو به پائین) حرکت آب در خاک ارائه گردید، نشان داد که این ضریب در خاک رسی به ترتیب برابر با ۰/۹۲۳، ۰/۸۵۳، ۰/۹۵۸ و ۰/۹۷۶ بود (شکل ۶). در حالیکه در خاک لومی این مقادیر به ترتیب ۰/۹۸۴، ۰/۹۵۶، ۰/۹۶۴ و ۰/۹۴۰ و در خاک شنی به ترتیب ۰/۸۶۷، ۰/۹۴۸، ۰/۸۸۴ و ۰/۸۹۹ برآورد شدند (شکل ۶). نتایج مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نشان داد که معادلات ارائه شده برای برآورد سرعت عمودی (رو به پائین) حرکت آب در خاک نیز، همانند معادلات مربوط به سرعت افقی، دارای عملکرد مناسبی هستند. در ارتباط با تخمین سرعت عمودی حرکت آب (رو به بالا)،

نتایج ارزیابی معادلات ارائه شده برای تخمین سرعت افقی حرکت آب نشان دادند که ضرایب تبیین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در خاک رسی به ترتیب برای قطره‌چکان‌های سطحی و قطره‌چکان‌ها با عمق نصب ۱۵cm، ۳۰cm و ۴۵cm برابر با ۰/۹۲۶، ۰/۹۷۰، ۰/۸۵۷ و ۰/۹۴۳ حاصل شد (شکل ۵). این ضرایب در خاک لومی به ترتیب ۰/۹۸۲، ۰/۹۲۴، ۰/۷۷۱ و ۰/۹۷۲ (شکل ۵) و در خاک شنی به ترتیب ۰/۹۴۸، ۰/۹۳۳، ۰/۹۱۰ و ۰/۹۶۳ برآورد شدند (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهند که معادلات ارائه شده دارای کارایی قابل‌توجهی در برآورد سرعت افقی حرکت آب در خاک هستند. ارزیابی ضرایب تبیین بین مقادیر اندازه‌گیری

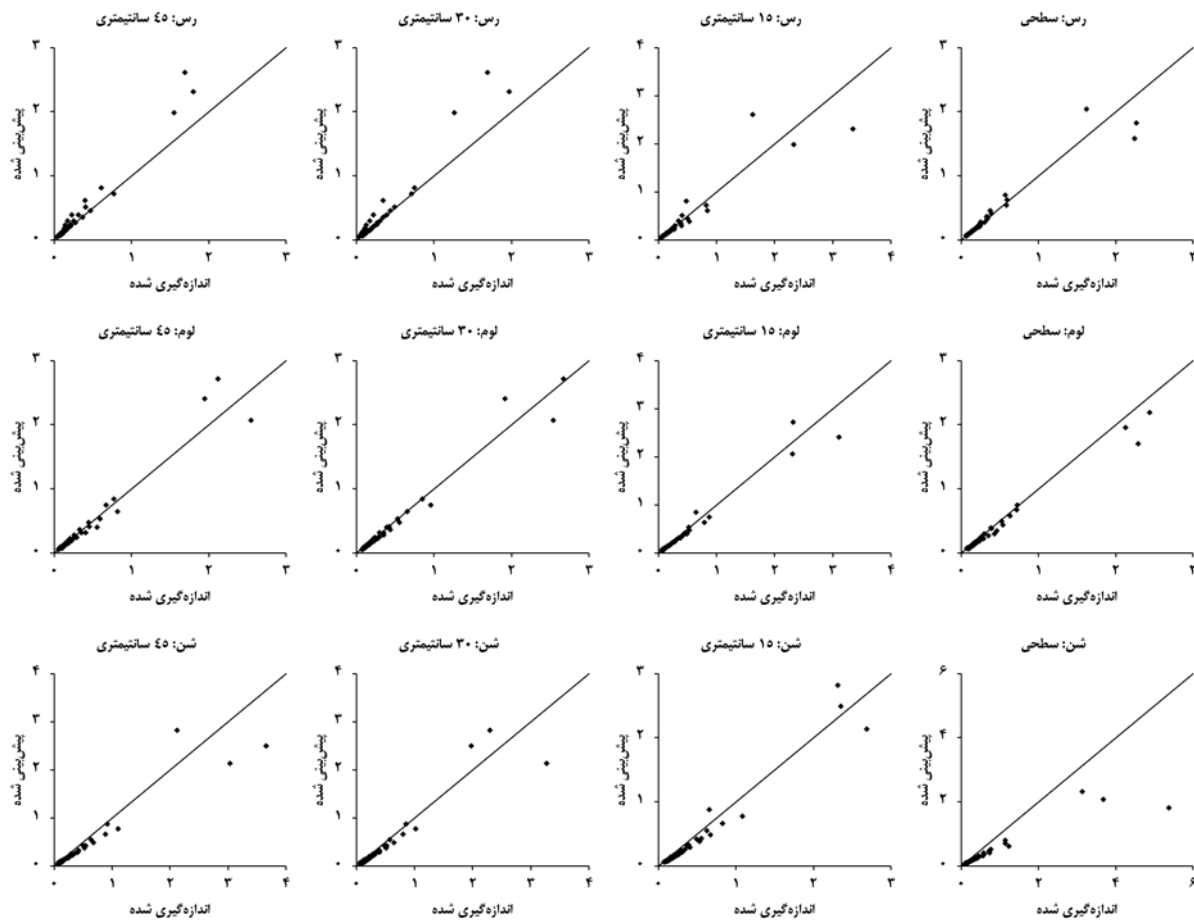
همچنین نتایج این تحقیق با مطالعات میرزایی و همکاران (۱۳۸۴) مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص گردید که نتایج این مطالعه همخوانی قابل توجهی با نتایج تحقیق مذکور دارد. همچنین استفاده از آنالیز ابعادی به منظور شبیه‌سازی الگوی توزیع سرعت دارای عملکرد قابل قبولی می‌باشد.

ضرایب تبیین بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در خاک رسی به ترتیب $0/947$ ، $0/760$ و $0/805$ (شکل ۷)، در خاک لومی به ترتیب $0/788/932$ و $0/797$ و در خاک شنی به ترتیب $0/927$ ، $0/935$ و $0/899$ حاصل شد (شکل ۷).

این نتایج، نشان‌دهنده کارایی معادلات ارائه شده در برآورد سرعت عمودی حرکت آب در خاک هستند.



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده سرعت افقی جبهه حرکت آب (سانتی‌متر بر دقیقه) در خاک رسی (ردیف اول)، لومی (ردیف دوم) و شنی (سوم) و برای اعماق مختلف نصب قطره‌چکان‌ها.

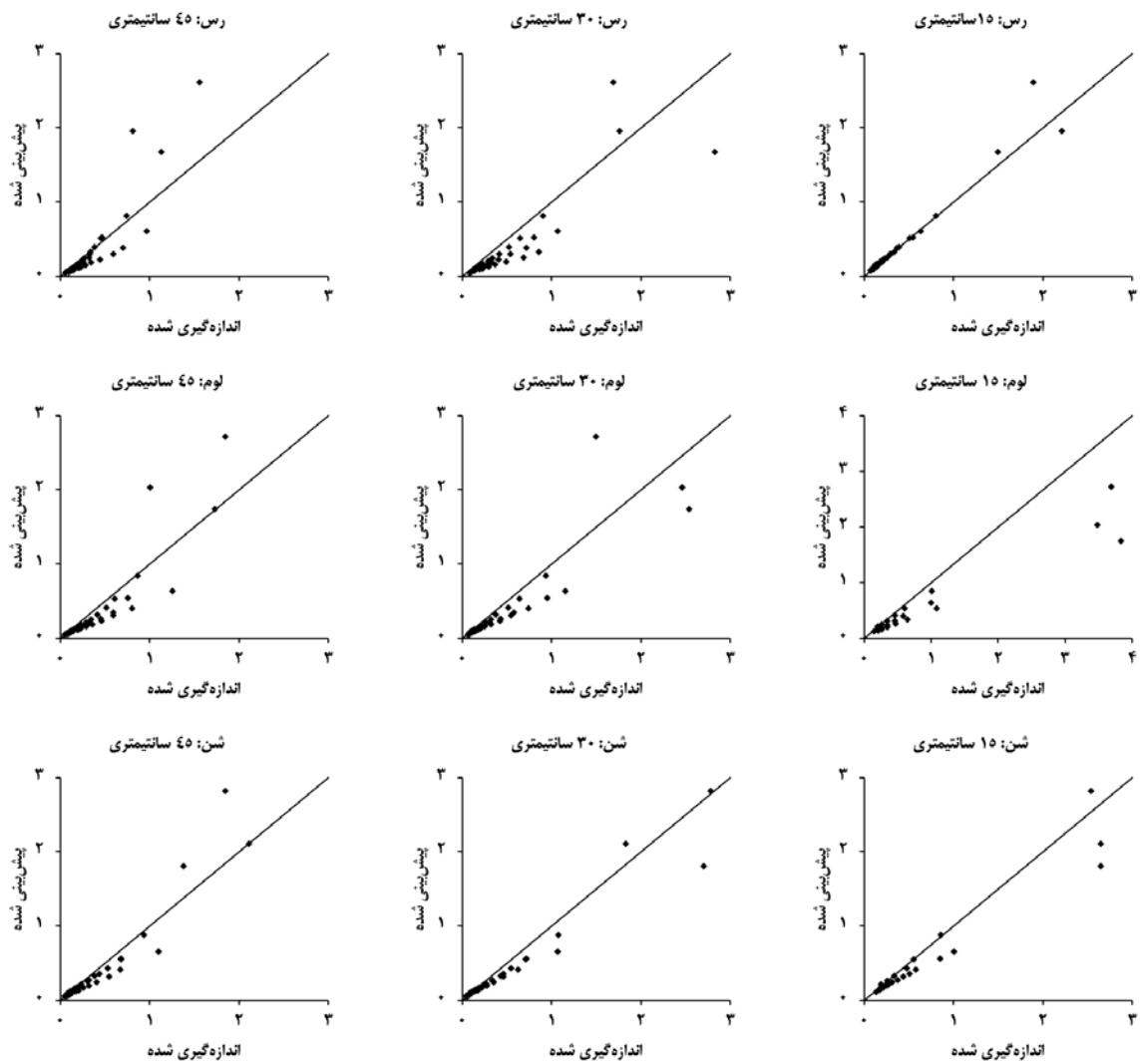


شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده سرعت عمودی جبهه حرکت آب (سانتی‌متر بر دقیقه) در خاک رسی (ردیف اول)، لومی (ردیف دوم) و شنی (سوم) و برای اعماق مختلف نصب قطره‌چکان‌ها.

نتیجه‌گیری کلی

به دلیل اهمیت شبیه‌سازی توزیع جبهه حرکت آب در خاک، در طراحی مناسب سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، در این مطالعه با استفاده از روش آنالیز ابعادی به تعیین معادلات ریاضی برای شبیه‌سازی سرعت پیشروی جبهه رطوبت در خاک پرداخته شد. برای تخمین سرعت پیشروی آب در خاک آزمایش‌هایی بر روی سه بافت مختلف خاک و با هدف ارائه معادلاتی به منظور تخمین سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در

جهات مختلف در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی انجام پذیرفت. به منظور تعیین ضرائب و توان‌های معادلات، از روش آنالیز ابعادی استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد که معادلات حاصل شده، قادرند با دقتی مناسب، سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در جهت افقی و عمودی (رو به بالا و رو به پایین) را شبیه‌سازی نمایند. کاربرد این معادلات در طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی می‌تواند منجر به بهبود عملکرد این سیستم‌ها گردد.



شکل ۷- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده سرعت عمودی (رو به بالا) جبهه حرکت آب (سانتی‌متر بر دقیقه) در خاک رسی (ردیف اول)، لومی (ردیف دوم) و شنی (سوم) و برای اعماق مختلف نصب قطره‌چکان‌ها.

منابع مورد استفاده

- میرزایی ف، لیاقت عم، سهرابی تم و امید م، ۱۳۸۴. نمون‌سازی جبهه رطوبتی خاک از منبع تغذیه خطی در آبیاری قطره-ای نواری. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۶، شماره ۲۲، صفحه‌های ۵۳ تا ۶۶.
- Goldberg D and Rimon D, 1976. Drip Irrigation Principles, Design and Agricultural Practices. Drip Irrigation Scientific Publication, Kfar Shymryahu, Israel.
- Meshkat M, Warner RC and Workman SR, 1999. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 125(6): 315-323.
- Cook FJ, Thorburn PJ, Fitch P, Charlesworth PB and Bristow KL, 2006. Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. Environmental Model Software 21:1353-1359.
- Schwartzman M, Zur B, 1986. Emitter Spacing and Geometry of Wetted Soil Volume. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 112(3): 242-253.
- Li J, Zhang J, and Rao M, 2004. Wetting Pattern and Nitrogen Distribution as Affected by Fertilization Strategies from a Surface Point Source. Journal of Agricultural Water Mangement 67: 89-104
- Kandelous MM and Simunek J, 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. Journal of Irrigation Science 28: 435-444.
- Lazarovitch N, Warrick AW, Furman A and Simunek J, 2007. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. Vadose Zone Journal 6:116-123.