

بسط معادلاتی برای برآورد الکوی سطح خیس شده در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به روش تحلیل ابعادی

بختیار کریمی^{۱*}، فرهاد میرزایی^۲، تیمور سهرابی^۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۰۶

^۱ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان

^۲ به ترتیب، دانشیار و استاد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Bakhtiar.Karimi@gmail.com

چکیده

از پارامترهای مهم در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی در نظر گرفتن الکوی سطح خیس شده خاک بالا و پائین قطره‌چکان می‌باشد. در این مطالعه، به کمک قضیه π باکینگهام و با استفاده از تحلیل ابعادی، روابطی به منظور تخمین سطح خیس شده جبهه حرکت آب در خاک بالا و پائین موقعیت نصب قطره‌چکان ارائه گردید. آزمایش‌ها در یک مدل فیزیکی پلکسی گلاس شفاف با ابعاد $(3m \times 1.22m \times 0.5m)$ به انجام رسید. در این تحقیق از سه نوع بافت (بافت متوسط، سنگین و سبک) مجزا استفاده گردید. در این تحقیق قطره‌چکان‌ها در چهار عمق نصب (عمق‌های صفر (سطحی)، ۱۵ (H₁)، ۳۰ (H₂) و ۴۵ (H₃) سانتی‌متری) مورد ارزیابی قرار گرفتند و همچنین دبی‌های قطره‌چکان‌ها با زمان آبیاری ۶ ساعت و با مقادیر ۲/۴ (Q₁)، ۴ (Q₂)، ۶ (Q₃)، لیتر بر ساعت اعمال گردید. در این تحقیق به کمک قضیه π باکینگهام و با استفاده از تحلیل ابعادی روابطی به منظور تخمین سطح خیس شده بالا و پائین قطره‌چکان‌ها در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی ارائه گردید. نتایج ارزیابی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده (با ضریب همبستگی بیش از ۹۰ درصد) نشان داد که این مدل‌ها با دقت بالایی سطح خیس شده را پیش‌بینی می‌کنند. متوسط مقادیر شاخص میانگین ریشه دوم خطا (RMSE) در تخمین سطح خیس شده پائین (در تمامی عمق‌ها) و برای بافت‌های رسی، لومی و شنی به ترتیب برابر با ۰/۰۱۵، ۰/۰۱۹ و ۰/۰۳۳ برآورد گردید که نشان از برتری نسبی معادلات در شبیه‌سازی سطح خیس شده جبهه رطوبتی در خاک‌های رسی می‌باشد. همچنین، متوسط مقادیر این شاخص در سطح خیس شده بالا برای بافت‌های مورد بررسی (به ترتیب، ۰/۰۲، ۰/۰۳۴ و ۰/۰۵۳) نشان‌دهنده دقت معادلات می‌باشد. در نظر گرفتن این روابط در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی می‌تواند باعث بهبود عملکرد این سامانه‌ها گردد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی، تحلیل ابعادی، شبیه‌سازی سطح خیس شده، مدیریت آبیاری

Developing Equations to Estimate Wetted Area Pattern for Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems by Dimensional Analysis

B Karimi^{1*}, F Mirzaei², T Sohrabi²

Received: 17 August 2014

Accepted: 27 December 2014

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

²- Assoc. Prof., and Prof., respectively, Dept. of Irrigation and Reclamation Engin., University of Tehran, Karaj, Iran

*Corresponding Author, E-mail: Bakhtiar.karimi@gmail.com

Abstract

One of the most important parameters in designing surface and subsurface drip irrigation systems is considering up and down soil wetting area of emitters. In this study, by means of Buckingham π theorem and using dimensional analysis, some equations were developed in order to estimate up and down soil wetted area of emitters. The experiments were carried out in a transparent plexiglass 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, 15, 30 and 45cm). The emitter outflows were considered 2.4, 4 and 6 Lhr⁻¹ with irrigation duration of 6hr. Then, using the π -theorem of Buckingham and dimensional analysis, equations were developed to estimate the up and down soil wetting area of emitters. The results of the comparisons between the simulated and measured values (evaluated correlation coefficient more than 90%) showed that these equations were very capable of predicting the soil wetting area. The average values of Root Mean Square Error (RMSE) for down wetted area (all depths) for the clay, loam and sandy soil textures were estimated as 0.015, 0.019 and 0.033, respectively which showed the relative superiority of the developed equations in the clay soil texture. Also, the average RMSE values for up wetted area in the same soil textures (0.02, 0.034 and 0.053, respectively) confirmed the equations accuracy. Considering these equations in designing surface and subsurface drip irrigation systems can improve these systems performance.

Keywords: Dimensional analysis, Irrigation management, Simulation of wetting area, Surface and subsurface drip irrigation

مقدمه

مؤثر دانست. از آنجایی که مدل‌های تحلیلی تخمین دقیقی از الگوی جبهه پیشروی حرکت آب در خاک را فراهم می‌کند (لام و همکاران ۲۰۰۷، کوک و همکاران ۲۰۰۳، توربورن و همکاران ۲۰۰۳) اما برخی از محققان تلاش می‌کنند که از مدل‌های ساده برای تخمین الگوی خیس شدگی در سامانه آبیاری قطره‌ای استفاده کنند (شوکیو-شینگ و همکاران ۲۰۰۷). مدل‌های تجربی زیادی به منظور تخمین قطر و عمق خیس شده پیاز رطوبتی در سامانه آبیاری قطره‌ای ارائه شده است که بازده بالایی در پیش‌بینی توزیع جبهه رطوبتی دارند (گلدبرگ و ریمون ۱۹۷۶، مشکات و همکاران ۱۹۹۹، امین و اخماج ۲۰۰۶، لی و همکاران ۲۰۰۴، لازارویچ و همکاران ۲۰۰۷،

بررسی الگوی رطوبت در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به‌عنوان یک موضوع مهم هم برای تحقیقات مزرعه‌ای و هم برای مدل‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار است (کوت و همکاران ۲۰۰۳، توربورن و همکاران ۲۰۰۳). مطالعات زیادی در این زمینه به انجام رسیده است که می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد. اما هنوز مطالعه جامع و کاملی به‌منظور تخمین سطح خیس شده پیاز رطوبتی صورت نگرفته است. گلدبرگ و ریمون (۱۹۷۶) سه فاکتور ویژگی خاک، دبی و حجم آب کاربردی را در رژیم خیس‌شدگی تحت آبیاری قطره‌ای

روابطی را با دخالت عوامل فیزیکی موثر بر حجم خاک مرطوب شده در زیر منبع تغذیه خطی و با استفاده از قضیه π باکینگهام و تحلیل ابعادی به دست آوردند. در نهایت این روابط با داده‌های اندازه‌گیری شده واسنجی شد و روابط علمی- تجربی به دست آمد که همخوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایش‌ها داد. علاوه بر آن معادلات ارائه شده تابعی از زمان هستند و در هر زمان امکان محاسبه قطر و عمق خاک خیس شده وجود دارد. لی و همکاران (۲۰۰۴) توزیع جبهه رطوبتی را در آبیاری قطره‌ای برای دو نوع خاک لوم و شن مورد بررسی قرار داد 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 افق و کاهش دبی باعث گسترده‌تری عمقی می‌شود. کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰b) مدل تحلیلی Wet up و مدل عددی هایدروس و مدل‌های تجربی شوارتزمن و کندلوس و امین را برای تخمین الگوی جبهه رطوبتی در سامانه آبیاری قطره‌ای مقایسه کردند و نتایج مقادیر مشاهده شده و اندازه‌گیری شده نشان داد که مدل عددی هایدروس نسبت به دیگر روش‌ها دارای خطای کمتر بود. لازارویچ و همکاران (۲۰۰۷) روش تحلیلی گشتاور را برای تخمین زمانی و مکانی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی پیشنهاد دادند. هدف اصلی این تحقیق پیش‌بینی سطح خیس شده جبهه رطوبتی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به منظور مدیریت بهینه آبیاری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نظریه تحلیل ابعادی

یکی از قضایای مهم تحلیل ابعادی در مکانیک سیالات قضیه π باکینگهام می‌باشد. این قضیه بیان می‌کند که اگر n متغیر بعد دار در یک معادله همگن ابعادی وجود داشته باشد که به وسیله m متغیر اصلی توصیف می‌شوند می‌توان آنها را با $n-m$ گروه بدون بعد تقسیم کرد. از جمله متغیرهای این تحقیق شامل دبی خروجی

الکینا و ابو آواد (۲۰۰۱). یکی از قضایای مهم تحلیل ابعادی در مکانیک سیالات قضیه π باکینگهام می‌باشد که با استفاده از این قضیه معادلات ارزشمندی برای پیش‌بینی توزیع پیشروی آب در خاک ارائه شده است (شوارتز و زور ۱۹۸۶، میرزایی و همکاران ۱۳۸۴، شو کیا شینگ و همکاران ۲۰۰۷، سینگ و همکاران ۲۰۰۶). بوفن (۲۰۱۰) مدل عددی هایدروس را برای شبیه‌سازی رطوبت در شرایط مزرعه و برای سه تیمار مختلف آبیاری ۲/۵، ۵ و ۷ میلی‌متر در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (با عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر) مورد ارزیابی قرار داد و دریافت که مدل هایدروس تخمین دقیقی از شرایط رطوبتی دارد. مشکات 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. کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰a) با استفاده از مدل هایدروس دو بعدی به شبیه‌سازی رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی پرداختند. در این تحقیق که بر روی یک خاک لومی رسی انجام شد نتایج نشان داد که مدل هایدروس توانایی مناسبی برای تخمین جبهه رطوبتی دارد. کوک و همکاران (۲۰۰۶) دو مدل Wet up و هایدروس را به منظور تخمین جبهه رطوبتی در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی مقایسه کردند و دریافتند که مدل عددی هایدروس پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به مدل تحلیلی Wet up دارد. دلیل این امر این است که در مدل تحلیلی یک سری فرضیات برای حل معادله بکار رفته است که باعث شده نتایج آن با نتایج واقعی اختلاف زیادی داشته باشد. بشارت (۱۳۸۸) مدل هایدروس را به منظور شبیه‌سازی توزیع رطوبت در ناحیه توسعه ریشه درخت سیب و با در نظر گرفتن تابع توزیع ریشه مورد ارزیابی قرار داد و دریافت که مدل هایدروس تخمین درستی از شرایط رطوبتی خاک دارد. شوارتز و زور (۱۹۸۶) هندسه پیاز رطوبتی را وابسته به نوع خاک، دبی قطره‌چکان و مقدار آب بکار رفته در نظر گرفتند و تاثیر نوع خاک در پیاز رطوبتی را با هدایت هیدرولیکی بیان کردند. میرزایی و همکاران (۱۳۸۴) به منظور شبیه‌سازی جبهه رطوبتی،

لحاظ ابعادی برابر شوند. پس از حل معادلات و تعیین مقادیر a و b ، روابط نهایی به صورت معادلات ۶ تا ۸ نوشته می‌شوند:

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

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

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

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:

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

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

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

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

$$A^* = m_1 V^{*m_1} \quad [۱۲]$$

در این معادله، m_1 و m_1 ضرایب ثابت می‌باشند. برای برگرداندن روابط بدون بعد به شکل ابعادی آن، بایستی به جای A^* مقادیر آنها جایگزین شوند.

با توجه به اینکه در سامانه آبیاری زیرسطحی هم پیاز رطوبتی بالای قطره‌چکان و هم پیاز رطوبتی پایین قطره‌چکان مد نظر می‌باشد، پس در سامانه 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:

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

قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی خاک، حجم آب نفوذ یافته، زمان آبیاری، سطح خیس شده در خاک در زمان آبیاری می‌باشد که با استفاده از قضیه بالا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(q, K_s, V, t, A) = 0 \quad [۱]$$

در معادله ۱، متغیرهای بعددار دبی خروجی قطره‌چکان (q)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s)، حجم آب نفوذ یافته (V)، زمان (t) و سطح خیس شده (A) 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 ، A باشد، معادله ۱ را می‌توان به شکل معادله ۲ نوشت:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad [۲]$$

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.

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

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

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

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

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

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

در این معادلات، دبی قطره‌چکان و هدایت هیدرولیکی به عنوان متغیرهای تکراری و حجم آب نفوذ یافته، زمان آبیاری و سطح خیس شده به عنوان متغیرهای غیرتکراری محسوب می‌شوند. در این معادلات توان‌ها باید به گونه‌ای تعیین شوند که هر π ، بدون بعد باشد و توان‌ها در سمت چپ معادلات برابر صفر در نظر گرفته شود. به بیان دیگر، باید دو طرف معادلات ۳ تا ۵ از

روش انجام آزمایش

این آزمایش‌ها در یک مدل پلکسی گلاس با ابعاد $۵m \times ۱/۲۲m \times ۳m$ در آزمایشگاه مرکزی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به انجام رسید، برای انجام آزمایش‌های عملی و اندازه‌گیری‌ها، یک مدل فیزیکی از جنس پلکسی گلاس با ساخته شد. مدل به سه قسمت مجزا تفکیک شد و امکان انجام همزمان سه آزمایش فراهم شد (شکل ۱). 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 لوله‌های اصلی، نیمه اصلی و فرعی به ترتیب ۵۰، ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر 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)، ۱۵cm (H₁), ۳۰cm (H₂) و ۴۵cm (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، سطح خیس شده محاسبه گردید (با استفاده از نرم افزارهای اتوکد و گرافر^۱). مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، در شرایط آزمایشگاهی و به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد.

در این معادله، iI و jI ضرایب ثابت می‌باشند. برای برگرداندن روابط بدون بعد به شکل ابعادی آن، بایستی بجای A^*up مقادیر آنها جایگزین شود. با در نظر گرفتن معادلات بالا و برازش روابط توانی بین اعداد بدون بعد، ضرایب معادلات (iI و mI و nI) بدون بعد برای سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بطور جداگانه محاسبه شدند. در این تحقیق 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 گرفت. به منظور ارزیابی معادلات بدست آمده، از شاخص‌های آماری بیشینه خطا (ME)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، ضریب تبیین (CD) استفاده گردید که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

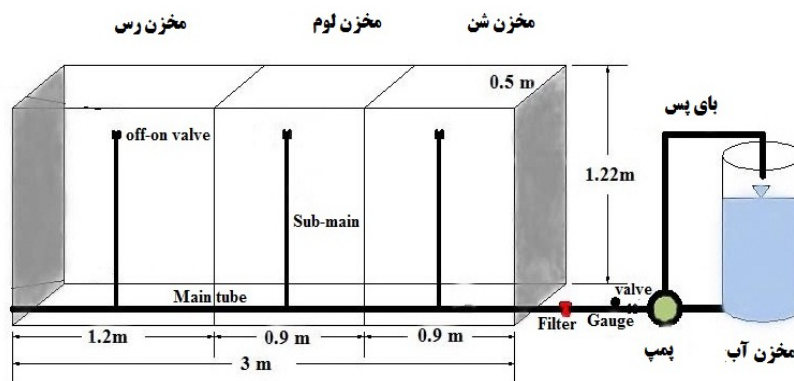
$$ME = \max |P_i - O_i| \quad [14]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad [15]$$

$$CD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad [16]$$

که در آنها P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌های بکار رفته و \bar{O} بیانگر مقادیر متوسط اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. کمینه مقدار ME ، $RMSE$ و CD صفر است. مقادیر زیاد ME نشان‌گر بدترین حالت کارکرد مدل است، در حالی که مقدار زیاد $RMSE$ نشان می‌دهد که برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات چقدر است. آماره CD نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری‌ها، نشان می‌دهد. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی این آماره‌ها برابر با: $ME=0$, $RMSE=0$, $CD=1$ خواهد شد.

^۱-Grapher



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

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده.

درصد رطوبت وزنی اشباع (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع (m hr ⁻¹)	چگالی حقیقی (g cm ⁻³)	چگالی ظاهری (g 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

نتایج و بحث

نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که ضریب همبستگی برای اعداد بدون بعد در محاسبه سطح خیس شده پائین قطره-چکان برای سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به ترتیب ۹۳/۲ و ۹۶/۸ می‌باشد و همچنین ضریب معادله توانی برازش شده مربوط به سامانه آبیاری سطحی ۹/۷۵۲ و توان معادله ۰/۷۶۲ می‌باشد و همچنین برای سامانه آبیاری زیر سطحی این ضرایب به ترتیب مقادیر ۴/۴۵۲ و ۰/۷۷۵ می‌باشد. به همین ترتیب ضرایب مربوط به سطح خیس شده بالای قطره‌چکان محاسبه گردید (شکل ۳) که ضریب معادله برای سامانه آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با عمق نصب کم (۱۵ سانتی‌متر) ۳/۷۱۴ و توان معادله ۰/۷۴۷ با ضریب همبستگی ۹۷/۳ می‌باشد و برای سامانه آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با عمق نصب زیاد (۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر)

ضریب و توان معادله به ترتیب ۸/۷۲۳ و ۰/۹۰۳ با ضریب همبستگی ۹۴/۵ می‌باشد که این ضرایب در معادلات اصلی مربوط به سطح خیس شده بالای قطره-چکان (Aup) جاگذاری گردد.

حال با جاگذاری ضرایب بالا در معادلات ۱۲ و ۱۳ روابط اصلی مربوط به سطح خیس شده بالا و پائین قطره‌چکان به صورت زیر محاسبه گردید.

روند تعیین ضرایب و توان‌ها در معادله ۱۷ به عنوان نمونه به طور کامل ارائه شده است. در این معادلات، زمان آبیاری (t) بر حسب دقیقه، دبی خروجی از قطره-چکان‌ها (q) بر حسب لیتر در ساعت، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) بر حسب متر بر ساعت و سطح خیس شده (در قسمت بالا و پائین قطره‌چکان) در خاک بر حسب سانتی‌متر مربع می‌باشد.

$$A^* = m_1 \cdot V^{*n_1} \xrightarrow{\text{replacement}} \left(\frac{1}{K_s} \right) \cdot A = m_1 \cdot \left(\left(\frac{K_s}{q} \right)^{1.5} \cdot V \right)^{n_1} \xrightarrow{V=q \cdot t} A$$

$$A = m_1 K_s^{(1.5n_1-1)} q^{(1-0.5n_1)} t^{n_1} \xrightarrow{m_1=9.752, n_1=0.762} A = 9.752 K_s^{0.143} q^{0.619} t^{0.762}$$

[۱۷] سطحی

$$A = 4.452 K_s^{0.162} q^{0.612} t^{0.775}$$

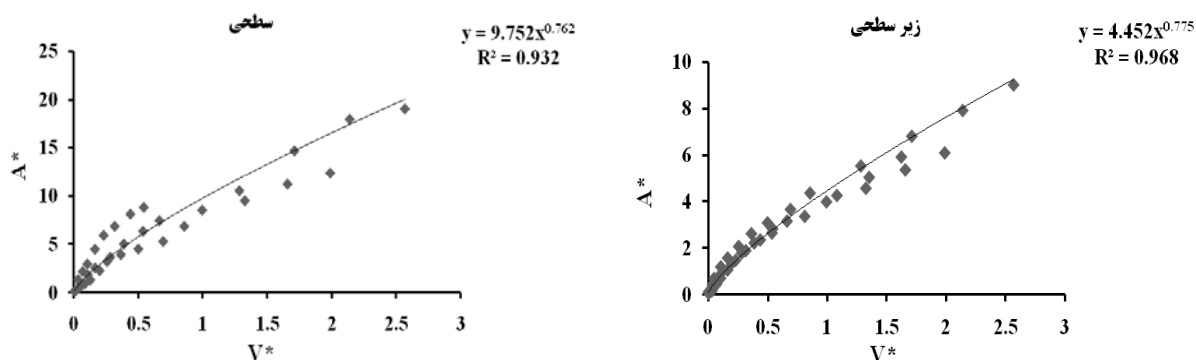
[۱۸] زیرسطحی

$$A_{up} = 3.714K_s^{0.12} q^{0.626} t^{0.747} \quad [19] \text{ [زیرسطحی (عمق ۱۵ سانتی‌متری)]}$$

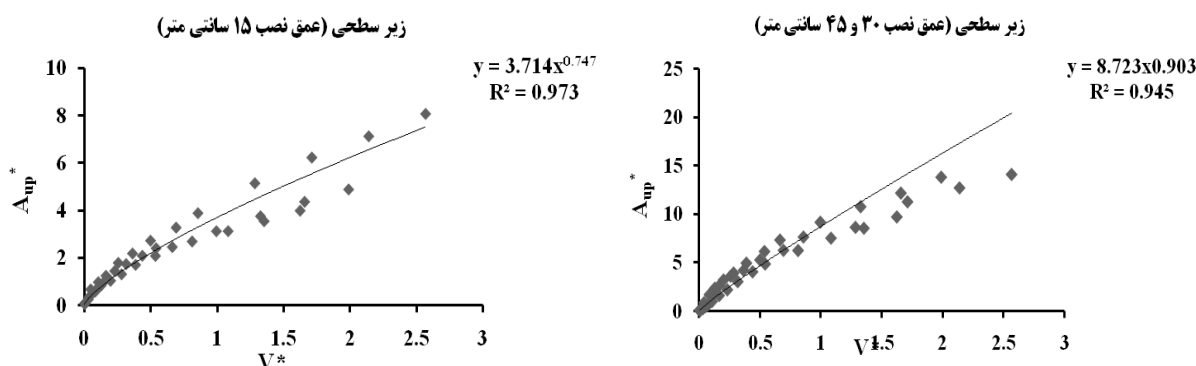
$$A_{up} = 8.723K_s^{0.354} q^{0.548} t^{-0.903} \quad [20] \text{ [زیرسطحی (اعماق ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متری)]}$$

استفاده از تحلیل ابعادی از ۳۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده گردید و معادلات مربوطه استخراج گردید برای ارزیابی معادلات برازش داده شده، بایستی مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مقایسه شوند. به همین دلیل مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در کلیه تیمارهای مورد بررسی مقایسه گردید.

در معادلات فوق ابعاد پارامترهای این معادلات به صورت زیر می‌باشد که زمان آبیاری (t) بر حسب دقیقه، دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها (q) بر حسب لیتر در ساعت، هدایت هیدرولیکی خاک (K_s) بر حسب متر بر ساعت و سطح خیس شده در قسمت بالا و پائین قطره‌چکان (A) در خاک بر حسب سانتی‌متر مربع می‌باشد. در این تحقیق با توجه به اینکه برای ارائه روابط با



شکل ۲- رابطه بین اعداد بدون بعد A^* و V^* در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی.



شکل ۳- رابطه بین اعداد بدون بعد A^* و A_{up}^* در سامانه آبیاری زیر سطحی.

۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر مقادیر ۸/۸۰، ۵/۹۸، ۶/۹۰ و ۹۵ می‌باشد (شکل ۴). همچنین ضرایب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در خاک لومی به ترتیب برای قطره‌چکان‌های سطحی، قطره‌چکان‌هایی با عمق نصب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر مقادیر ۱/۸۸، ۷/۹۷، ۹۹ و ۶/۹۴ می‌باشد (شکل ۵). همچنین ضرایب همبستگی بین

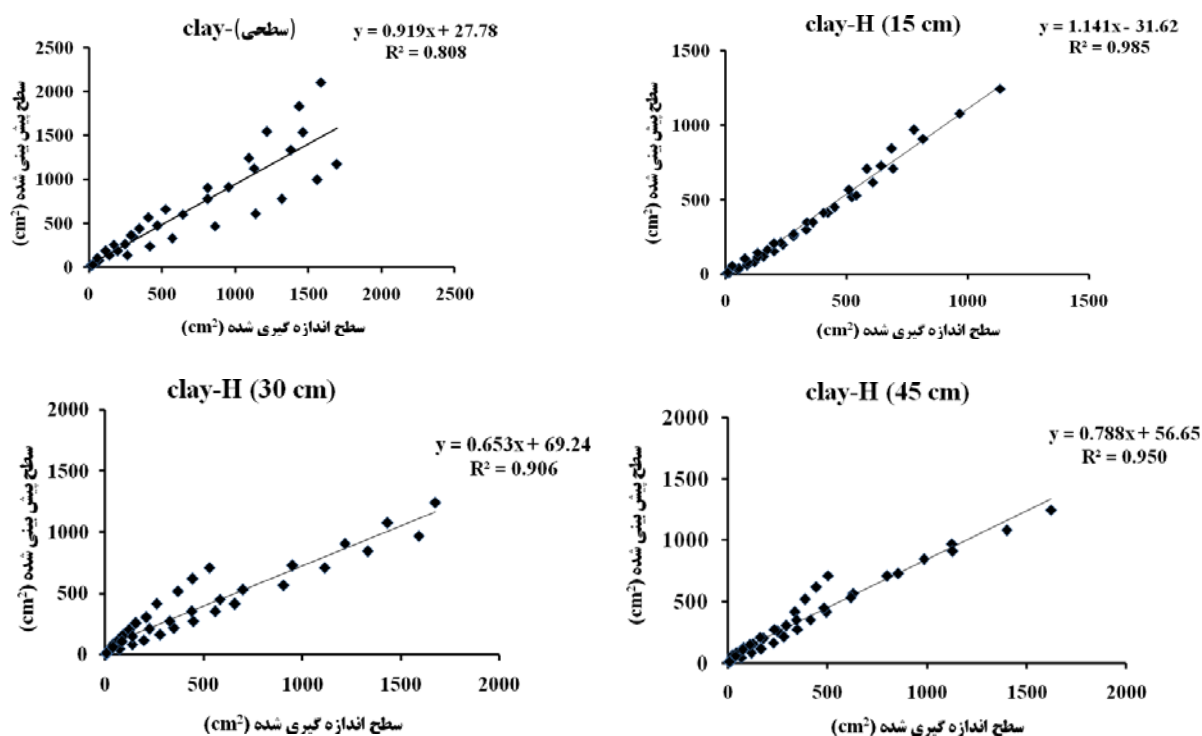
نتایج ارزیابی ضرایب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در معادلاتی که برای برآورد سطح خیس شده پائین قطره‌چکان ارائه گردید، نشان داد که این ضریب در خاک رسی و به ترتیب برای قطره‌چکان‌های سطحی، قطره‌چکان‌هایی با عمق نصب ۱۵

شبیه‌سازی شده در خاک شنی به ترتیب برای قطره-چکانهایی با عمق نصب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر مقادیر ۹۶/۷، ۸۳/۹ و ۸۸/۲ می‌باشد (شکل ۹). نتایج مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نیز نشان داد که معادلات ارائه شده برای برآورد سطح خیس شده بالای قطره‌چکان در خاک نیز دارای عملکرد بالایی می‌باشد. همچنین عملکرد این مدل‌ها توسط پارامترهای آماری خطا در جدول ۲ نشان می‌دهد که این پارامترهای آماری در محدوده قابل قبولی می‌باشد. همچنین در بعضی از تیمارها آماره CD نسبتاً زیاد می‌باشد (سطح خیس شده پائین قطره‌چکان در خاک‌های لومی و شنی و عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر) اما در این تیمارها پارامترهای دیگر هم نیز ملاک ارزیابی می‌باشند که در محدوده قابل قبولی می‌باشند (پارامتر $RMSE$ و ME برای خاک لومی و عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر به ترتیب مقادیر ۰/۰۲۷ و ۰/۰۶۳ می‌باشد و برای خاک شنی این مقادیر به ترتیب ۰/۰۴۲ و ۰/۱۳ می‌باشد).

مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در خاک شنی به ترتیب برای قطره‌چکان‌های سطحی، قطره‌چکان‌هایی با عمق نصب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر مقادیر ۹۷/۹، ۹۸/۵، ۹۴/۷ و ۹۵/۴ می‌باشد (شکل ۶). نتایج مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نیز نشان داد که معادلات ارائه شده برای برآورد سطح خیس شده پائین قطره‌چکان در خاک نیز دارای عملکرد بالایی می‌باشد. همچنین ارزیابی ضرایب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در معادلاتی که برای برآورد سطح خیس شده بالای قطره‌چکان ارائه گردید، نشان داد که این ضریب در خاک رسی و به ترتیب قطره‌چکان‌هایی با عمق نصب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر مقادیر ۹۴/۹، ۹۴/۴ و ۸۸/۴ می‌باشد (شکل ۷). همچنین ضرایب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در خاک لومی به ترتیب برای قطره‌چکان‌هایی با عمق نصب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر مقادیر ۹۴/۸، ۹۶/۱ و ۸۸/۴ می‌باشد (شکل ۸). همچنین ضرایب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و

جدول ۲- آماره‌های عملکرد مدل در بافت‌های مختلف خاک.

سطح خیس شده بالا			سطح خیس شده پائین			عمق نصب	بافت خاک
CD	ME	RMSE	CD	ME	RMSE		
---	---	---	۰/۹۵۴	۰/۰۵۶	۰/۰۲۴	سطحی	رسی
۰/۶۴	۰/۰۲۶	۰/۰۰۸	۰/۷۵۳	۰/۰۱۹	۰/۰۰۶	۱۵	
۰/۵۹	۰/۰۷۳	۰/۰۲۱	۱/۹۶	۰/۰۶۲	۰/۰۲۱	۳۰	
۰/۵۸	۰/۰۸۴	۰/۰۰۳	۱/۵۲	۰/۰۳۸	۰/۰۱۱	۴۵	لومی
---	---	---	۰/۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۲۱	سطحی	
۱/۰	۰/۰۲۴	۰/۰۱۴	۱/۲۲	۰/۰۲۵	۰/۰۱۲	۱۵	
۰/۲۸۴	۰/۱۳۴	۰/۰۴۳	۱/۷۹	۰/۰۶۳	۰/۰۲۷	۳۰	شنی
۰/۳۴۵	۰/۱۲۶	۰/۰۴۴	۱/۶	۰/۰۳۲	۰/۰۱۷	۴۵	
---	---	---	۰/۹۶	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	سطحی	
۰/۹۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۱	۱/۹۹	۰/۱۲	۰/۰۴۱	۱۵	شنی
۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۷۶	۲/۲۱	۰/۱۳	۰/۰۴۲	۳۰	
۰/۱۴	۰/۰۲۱	۰/۰۷۳	۲/۰۵	۰/۱۱	۰/۰۳۴	۴۵	

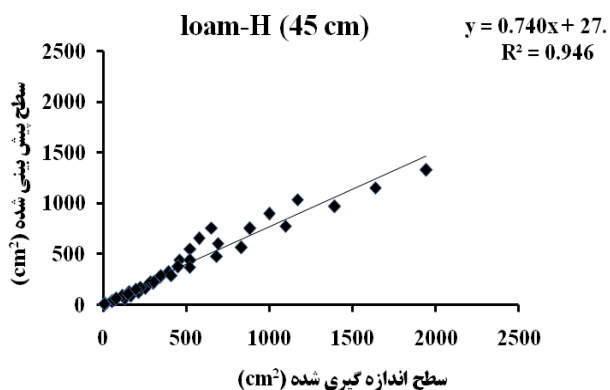
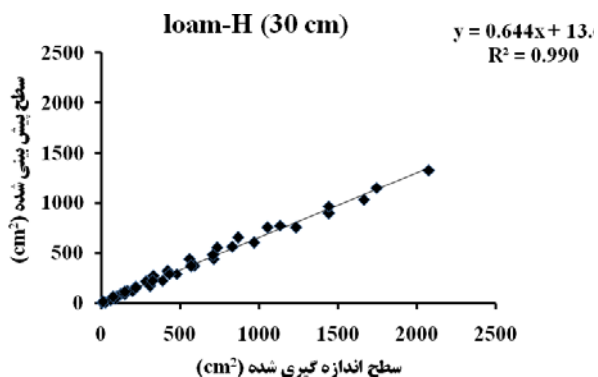
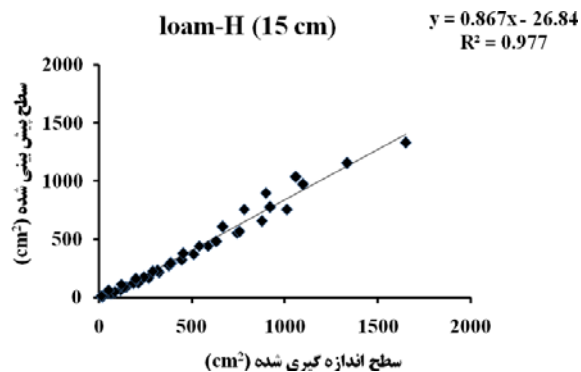
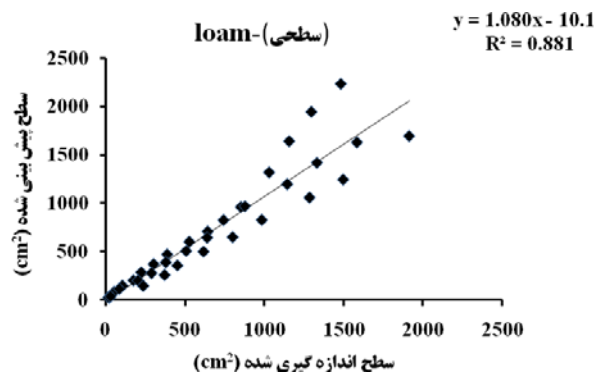


شکل ۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده سطح خیس شده پائین قطره‌چکان در خاک رسی و برای اعماق مختلف نصب قطره-چکان‌ها.

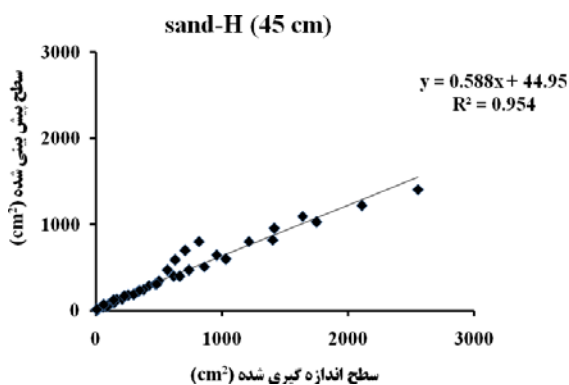
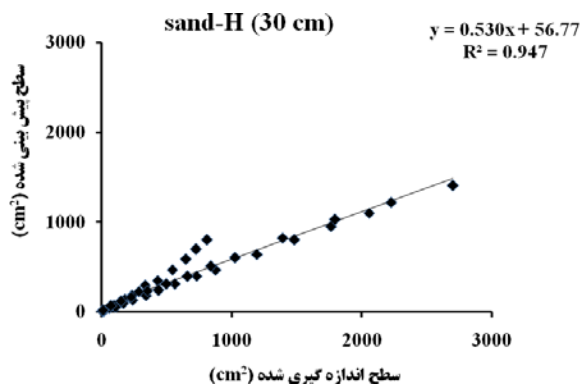
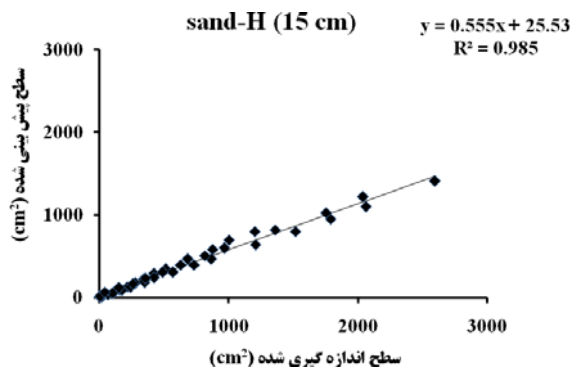
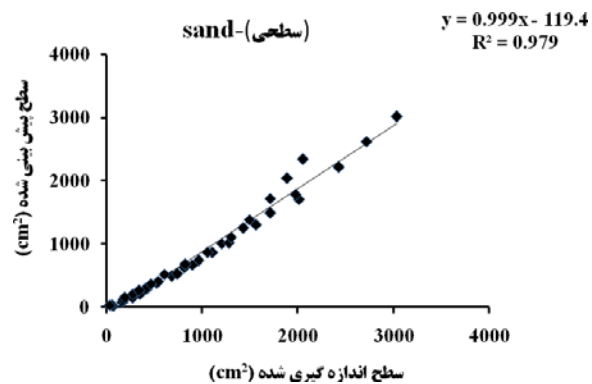
این مدل‌ها توسط پارامترهای آماری خطا نشان می‌دهد که محدوده پارامترهای آماری در محدوده قابل قبولی می‌باشد. متوسط مقادیر شاخص ریشه دوم میانگین مربعات خطا ($RMSE$) در تخمین سطح خیس شده پائین (در تمامی عمق‌ها) و برای بافت‌های رسی، لومی و شنی به ترتیب برابر با ۰/۰۱۵، ۰/۰۱۹ و ۰/۰۳۳ برآورد گردید که نشان از برتری نسبی معادلات در شبیه‌سازی سطح خیس شده جبههٔ رطوبتی در خاک‌های رسی می‌باشد. همچنین، متوسط مقادیر این شاخص در سطح خیس شده بالا (به ترتیب، ۰/۰۲، ۰/۰۳۴ و ۰/۰۵۳) نشان‌دهنده دقت معادلات می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

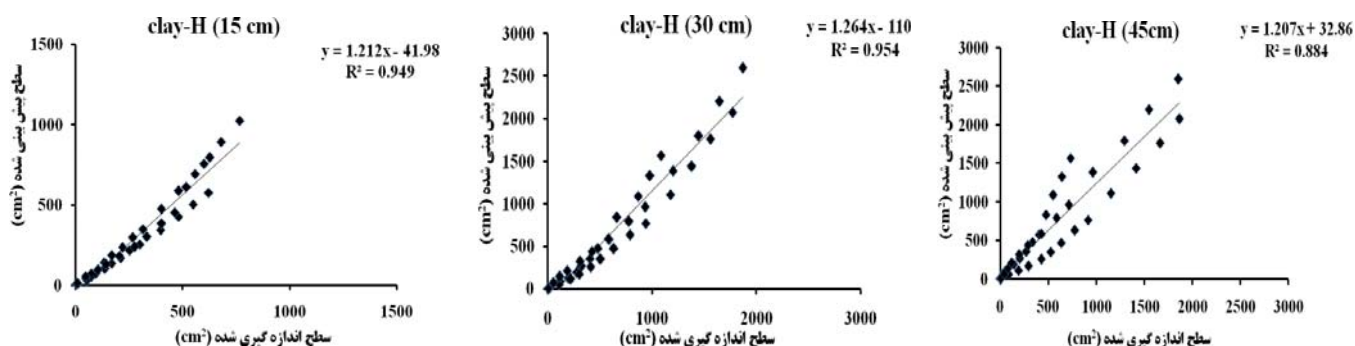
این تحقیق با هدف ارائه معادلاتی به منظور تخمین سطح خیس شده بالا و پائین قطره‌چکان‌ها در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی انجام پذیرفت. به منظور تعیین ضرایب و توان‌های معادلات، از روش تحلیل ابعادی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که معادلات حاصل شده قادرند با دقت مناسبی، سطح خیس شده (بالا و پایین) را شبیه‌سازی نمایند. کاربرد این معادلات در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی می‌تواند منجر به بهبود عملکرد این سامانه‌های گردد. همچنین ارزیابی عملکرد



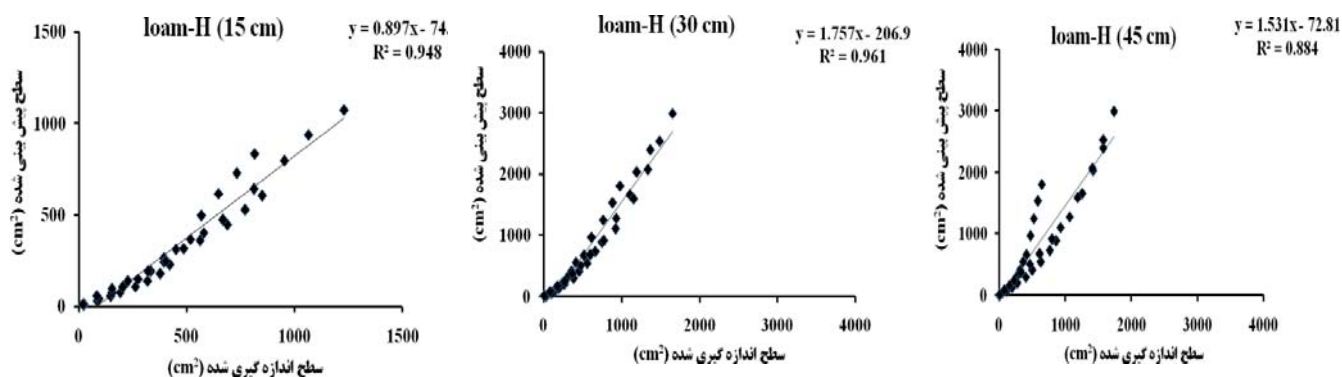
شکل ۵- مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده سطح خیس شده پائین قطر هچکان در خاک لومی و برای اعماق مختلف نصب قطره-چکان ها.



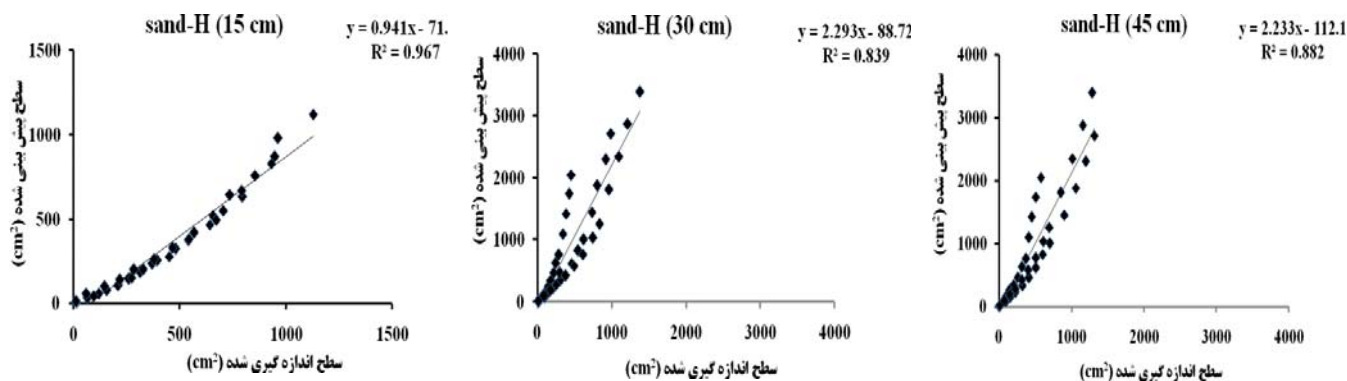
شکل ۶- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده سطح خیس شده پائین قطرچکان در خاک شنی و برای اعماق مختلف نصب قطرچکان‌ها.



شکل ۷- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده بالای قطرچکان در خاک رسی و برای اعماق مختلف نصب قطرچکان‌ها.



شکل ۸- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده بالای قطرچکان در خاک لومی و برای اعماق مختلف نصب قطرچکان‌ها.



شکل ۹- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مساحت خیس شده بالای قطرچکان در خاک شنی و برای اعماق مختلف نصب قطرچکان‌ها.

منابع مورد استفاده

- بشارت س، ۱۳۸۸. بررسی انتقال آب در خاک با جذب آن توسط گیاه بر اساس مطالعات میدانی و حل معادلات حاکم. رساله دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه تبریز.
- میرزایی ف، لیاقت عم، سهرابی تم و امید م، ۱۳۸۴. نمون‌سازی جبهه رطوبتی خاک از منبع تغذیه خطی در آبیاری قطره‌ای نواری. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۶، شماره ۲۲، صفحه‌های ۵۳ تا ۶۶.

- Al-Qinna MI and Abu-Awwad AM, 2001. Wetting patterns under trickle source in arid soils with surface crust. *Journal of Agricultural Engineering Research* 80(3): 301–305.
- Amin MSM and Ekhamaj AIM, 2006. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In: 7th International micro irrigation congress, 10–16 Sept, PWTC, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Bufon VB, 2010. optimizing subsurface drip Irrigation design and management with hydrus-2D/3D model. Ph.d thesis in Texas Tech University.
- Cook FJ, Thorburn PJ, Fitch P and Bristow KL, 2003. Wet Up: a software tool to display approximate wetting pattern from drippers. *Irrig. Sci* 22:129–134.
- Cook FJ, Thorburn PJ, Fitch P, Charlesworth PB and Bristow KL, 2006. Modeling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environ Model Softw* 21:1353–1359.
- Cote CM, Bristow KL, Charlesworth PB, Cook FJ, and Thorburn PJ, 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci* 22: 143-156.
- Goldberg D and Rimon D, 1976. *Drip Irrigation Principles, Design and Agricultural Practices*. Drip Irrigation Scientific Publication, Kfar Shymryahu, Israel.
- Kandelous MM and Simunek J, 2010a. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agri. Water Mang.* 97: 1070-1076.
- Kandelous MM 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.
- Meshkat M, Warner RC and Workman SR, 1999. Modeling of Evaporation Reduction in Drip Irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 125 (6): 315- 323.
- Lamm FR, Ayars JE and Nakayama FS, 2007. *Micro irrigation for crop production (Design, Operation and Management)*. Elsevier Publications. <http://www.elsevier.com/books/microirrigation-for-crop-production/lamm/978-0-444-50607>.
- Lazarovitch N, Warrick AW, Furman A and Simunek J, 2007. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *Vadose Zone J* 6:116–123.
- Li J, Zhang J, Rao M, 2004. Wetting Pattern and Nitrogen Distribution as Affected by Fertilization Strategies from a Surface Point Source. *Agri. Water Mang.*, 67: 89-104.
- Schwartzman M, Zur B, 1986. Emitter Spacing and Geometry of Wetted Soil Volume. *Irrig. and Drain.* 112: 242-253.
- Shu Qiaosheng, Liu Z, Wang Z and Liang H, 2007. Simulation of the Soil Wetting Shape under Porous pipe Sub-Irrigation using Dimensional Analysis. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 125: 389- 398.
- Singh DK, Rajput TBS, Singh DK, Sikarwar HS, Sahoo RN and Ahmad T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agric. Water. Mang.*, 83: 130-134.
- Thorburn PJ, Cook FJ, and Bristow KL, 2003. Soil- dependant wetting from trickle emitters: Implications for system design and management. *Irrig. Sci* 22: 121-127.