

## شبیه‌سازی عددی و تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای

سعید صمدیان فرد<sup>1\*</sup>، علی اشرف صدرالدینی<sup>2</sup>، امیر حسین ناظمی<sup>3</sup>، داود فرسادی زاده<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 88/10/12 تاریخ پذیرش: 89/12/16

<sup>1</sup>-دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>2</sup>-دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>3</sup>-استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>4</sup>-دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبه E-Mail: [s.samadian@tabrizu.ac.ir](mailto:s.samadian@tabrizu.ac.ir)

### چکیده

تحقق پتانسیل کامل آبیاری قطره‌ای، نیازمند بهینه‌سازی پارامترهای بهره‌برداری است. در یک خاک معین توسعه زمانی حجم خیس شده در تعیین فاصله مناسب بین قطره‌چکان‌ها و دور آبیاری به عنوان تابعی از حجم خاکی که ریشه‌های گیاه در آن قرار گرفته‌اند نقش دارد. شبیه‌سازی عددی و تحلیلی، راه‌حلی آسان و کم‌هزینه برای مطالعه فعالیت‌های مدیریتی آبیاری قطره‌ای بهینه می‌باشد. در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، ابتدا مشخصات فیزیکی خاک تعیین گردید. سپس به منظور محاسبه پارامترهای مدل ون‌گنوختن، منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشار تعیین شد. همچنین برنامه‌هایی برای حل روابط فیلپ و بن‌آشر با استفاده از زبان برنامه‌نویسی *Mathematica 7.0* نوشته شد و نرم افزار هایدروس دو بُعدی برای شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه آماری بین فواصل شعاعی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده از محل قطره‌چکان به منظور ارزیابی دقت مدل‌های تحلیلی و عددی انجام پذیرفت. نتایج نشان دادند که مدل هایدروس دو بُعدی با داشتن میانگین خطای استاندارد 3/32572 و با ضریب همبستگی 0/9607، تطابق بهتری با داده‌های مشاهداتی در مقایسه با مدل‌های دیگر داشته و بهترین روش در شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، جبهه رطوبتی، شبیه‌سازی حرکت آب

## Numerical and Analytical Simulation of Wetting Front Advancing in Drip Irrigation

S Samadianfard<sup>1\*</sup>, AA Sadraddini<sup>2</sup>, AH Nazemi<sup>3</sup>,

D Farsadi zadeh<sup>2</sup>

Received: 2 Januray 2010, Accepted: 7 March 2011

<sup>1</sup> PhD Student, Dept. of Water Eng, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Dept. of Water Eng, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Prof, Dept. of Water Eng, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>4</sup> Assoc. Prof., Dept. of Water Eng, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

\*corresponding author E-mail: [s.samadian@Tabrizu.ac.ir](mailto:s.samadian@Tabrizu.ac.ir)

### Abstract

Achieving the full potential of drip irrigation requires optimizing its effective operational parameters. For a given soil, knowing the temporal evolution of the wetted volume can contribute to a proper determination of emitter spacing and duration of irrigation as a function of the root zones soil volume. To investigate the optimal drip management practices, numerical and analytical simulations are easy and inexpensive approaches. In this study, the physical properties of the soil for simulation of wetting front position in drip irrigation were determined. Then, in order to calculate Van Genuchten model parameters, soil water characteristic curve was determined by means of a pressure membrane apparatus. Also, for solving the Philip and Ben-Asher equations, some computer programs were provided using Mathematica 7.0. The HYDRUS 2D was used for numerical simulations. Statistical comparisons of the simulated and observed radial distances from emitters were employed to evaluate the accuracy of the analytical and numerical models. Results showed that HYDRUS 2D output with relevant root mean square error of 3.32572 and correlation coefficient of 0.9607 had a better agreement with the observed wetting front data in comparison with other methods and, in general, it's the best method for simulating of wetting front in drip irrigation.

**Keywords:** Drip irrigation, Water movement simulation, Wetting front

### مقدمه

پیاده کردن این روش‌ها از جمله راه‌های افزایش بازده آبیاری و کارایی مصرف آب است. از روش‌های جدید آبیاری که به سرعت در کشورهای مختلف رو به گسترش است، روش قطره‌ای است. آبیاری قطره‌ای به

با تمام پیشرفت‌هایی که در علم آبیاری حاصل شده است، هنوز متوسط بازده آبیاری سطحی در دنیا از 35 درصد تجاوز نمی‌کند (علیزاده 1380). پذیرش شیوه‌های جدید آبیاری و استفاده از فن‌آوری‌های مناسب برای

خاک مختلف که در برگیرنده محدوده گسترده‌ای از مشخصات هیدرولیکی بودند، اثرات بافت و نوع خاک در الگوی خیس‌شدگی را بررسی نمودند. اسکگز و همکاران (2004) شبیه‌سازی‌های هایدروس دو بُعدی از آبیاری قطره‌ای را با داده‌های آزمایشی مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که شبیه‌سازی‌های هایدروس دو بُعدی در مورد توزیع مقدار رطوبت در خاک تطابق خوبی با داده‌های آزمایشی دارد. نتایج این تحقیق استفاده از هایدروس را به عنوان وسیله‌ای برای بررسی و طراحی فعالیت‌های مدیریتی آبیاری قطره‌ای توجیه می‌کند. چن و همکاران (2006) روشی را به منظور حل تحلیلی معادله ریچاردز ارائه نمودند. آنها با فرض شار ثابت از منبع خطی، راه‌حل تحلیلی را برای محاسبه توزیع مقدار رطوبت در حین آبیاری از حل معادله دو بُعدی خطی شده ریچاردز به دست آوردند. پروونزانو (2007) در تحقیقی حجم مرطوب شده خاک را در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ارزیابی نمود. در این مطالعه مناسب بودن مدل شبیه ساز هایدروس در مقیاس یک قطره‌چکان بر اساس داده‌های مشاهداتی و به منظور ارزیابی فرآیند نفوذ در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بررسی شده و مورد تایید قرار گرفته است. در چند دهه گذشته پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در درک و توصیف ریاضی جریان آب و فرآیندهای انتقال مواد محلول در منطقه غیراشباع مشاهده شده است. در حال حاضر انواع مدل‌های تحلیلی و عددی برای پیش‌بینی فرآیندهای انتقال آب و مواد محلول بین سطح خاک و بستر آب زیرزمینی وجود دارند. مشهورترین مدل‌ها عبارتند از معادله ریچاردز برای جریان غیراشباع و معادله همرفت - انتشار فیک برای انتقال مواد محلول. هدف از این تحقیق بررسی دقت روش عددی هایدروس و روش‌های تحلیلی فیلیپ و بن‌آشر در شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای بر اساس داده‌های مشاهداتی در یک مزرعه با خاک لوم‌شنی و با دبی‌های 2، 4 و 6 لیتر بر ساعت می‌باشد.

کلیه روش‌هایی گفته می‌شود که در آن‌ها آب به مقدار کم و حدود 1 تا 10 لیتر در ساعت به آرامی در نزدیک گیاه ریخته می‌شود. به همین دلیل این روش‌ها را آبیاری با حجم کم نامیده‌اند. در آبیاری قطره‌ای آب در یک سیستم لوله‌ای در مزرعه توزیع می‌شود و وسیله مکانیکی که آب از آن به خارج گسیل و در اختیار گیاه قرار می‌گیرد، خروجی یا قطره‌چکان نام دارد.

با توجه به اهمیت پدیده پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای و تأثیراتی که این فرایند در مدیریت بهینه آبیاری قطره‌ای و افزایش بازده آن دارد، تحقیقات بسیار وسیعی در سراسر دنیا بر روی این موضوع انجام شده است، متخصصان علم آبیاری از یک سو و صاحب‌نظران علم هیدرولوژی از جهات مختلف این فرآیند را مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند. در این بخش تحقیقاتی که در دهه‌های اخیر در این زمینه انجام گردیده، آورده شده است:

بن‌آشر و همکاران (1978) مدل‌های خطی و غیرخطی نفوذ از منبع نقطه‌ای را مورد بررسی قرار داده و راه‌حل‌های عددی و تحلیلی را برای حل این مدل‌ها ارائه نمودند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که راه‌حل عددی برآوردهای مناسب‌تری را برای حالت‌های خیس‌شدگی و خشک‌شدگی ارائه می‌دهند. فیلیپ (1984) راه‌حل‌هایی را به منظور محاسبه زمان‌های پیمایش از منابع نقطه‌ای سطحی و زیرسطحی ارائه نمود. این روش‌ها بر اساس تحلیل شبه‌خطی جریان دائمی غیراشباع سه بُعدی پایه‌گذاری شده‌اند. در نهایت، فیلیپ نتایج حاصل از روش را به صورت گرافیکی ارائه نمود. بن‌آشر (1986) مدل نیم‌کروی تقریبی را برای محاسبه نفوذ از قطره‌چکان سطحی در آبیاری قطره‌ای معرفی نمود. در این تحقیق 4 مدل در محاسبه پیشروی جبهه رطوبتی مورد بررسی قرار گرفته و دقت مدل مذکور با مقایسه نتایج آن با داده‌های آزمایشی مورد تایید قرار گرفته است. توربورن و همکاران (2003) در تحقیقی به بررسی حجم خیس شده خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی پرداختند. آنها با بررسی 29 نوع

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad [4]$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad [5]$$

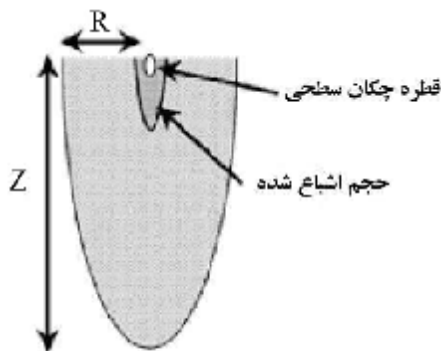
در روابط 3 الی 5، مقدار رطوبت اشباع حجمی  $q_s$ ، مقدار رطوبت باقیمانده  $q_r$ ، هدایت هیدرولیکی اشباع  $[LT^{-1}]$ ،  $n, a, l$  پارامترهای شکل  $[-]$  می‌باشند.

#### معادلات فیلیپ

فیلیپ (1984) زمان پیمایش جبهه رطوبتی از منبع نقطه‌ای سطح خاک به صورت شعاعی و عمودی (شکل 1) را به صورت پارامترهای بی بُعد زمانی  $(T)$ ، فاصله عمودی  $(Z)$  و فاصله شعاعی  $(R)$  به صورت زیر ارائه نمود:

$$T = \frac{Z^2}{2} - Z + Ln(1+Z) \quad [6]$$

$$T = 2 \exp(R) \left[ 1 - R + \frac{R^2}{2} \right] - 2 \quad [7]$$



شکل 1- طرح کلی حجم خیس شده خاک در آبیاری طره‌ای در روابط 6 و 7 داریم:

$$T = \frac{a^3 q t}{16 p \Delta q} \quad [8]$$

$$Z = \frac{az}{2} \quad [9]$$

$$R = \frac{ar}{2} \quad [10]$$

#### معادله ریچاردز

جریان یکنواخت هم دمای آب به صورت سه‌بُعدی را در یک محیط متخلخل غیراشباع در نظر بگیرید و فرض کنید که فاز هوا نقش مهمی در فرآیند جریان مایع ندارد. معادله جریان موجود برای این شرایط از طریق شکل اصلاح شده معادله ریچاردز به صورت زیر ارائه می‌شود (سیمونک و همکاران 2006)

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K \left( K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S \quad [1]$$

که در آن  $q$  مقدار رطوبت حجمی  $[L^3 L^{-3}]$ ،  $h(q)$  بار فشار  $[L]$  و  $S$  جمله تخلیه  $[T^{-1}]$  می‌باشد.

$x_i$  مختصات مکانی  $[L]$ ،  $t$  زمان  $[T]$  و  $K_{ij}^A$  مولفه‌های بی‌بُعد تانسور ناهمسانی  $K^A$  و  $K_{iz}^A$  مولفه‌های بی‌بُعد تانسور ناهمسانی  $K^A$  در محور  $z$  می‌باشند،  $K$  عبارت است از تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $[LT^{-1}]$  که به صورت معادله 2 بیان می‌گردد.

$$K(h, x, y, z) = K_s(x, y, z) K_r(h, x, y, z) \quad [2]$$

در این معادله  $K_r$  هدایت هیدرولیکی نسبی و  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع  $[LT^{-1}]$  می‌باشند. لازم به ذکر است

که در رابطه [1]، زیرنویس‌های  $i$  و  $j$  به منظور نشان دادن محورهای مختصات در جهت‌های  $x, y$  و  $z$  به کار برده می‌شوند و تانسور  $K_{ij}^A$  نیز به منظور تشریح ناهمسانی نفوذپذیری خاک در جهت‌های مختلف به کار می‌رود. درایه‌های قطری  $K_{ij}^A$  برابر با یک و درایه‌های غیرقطری برابر با صفر هستند.

توابع مختلفی توسط محققین برای تشریح پدیده نگهداشت آب در خاک ارائه شده‌اند که در این تحقیق از توابع هیدرولیکی خاک ون‌گنوختن (1980) که به صورت روابط 3 الی 5 ارائه شده‌اند، استفاده شده است.

$$q(h) = \begin{cases} q_r + \frac{q_s - q_r}{[1 + |ah|^n]^m} & h < 0 \\ q_s & h \geq 0 \end{cases} \quad [3]$$

ایستگاه تحقیقاتی خلعت پوشان و آزمایشگاه آبیاری دانشگاه تبریز انجام گردید. در این آزمایش‌ها، در سه لوله جانبی آبیاری قطره‌ای به طول 15 متر که در هر یک از آنها 6 قطره‌چکان به فاصله 2 متری از هم نصب شده بودند، دبی‌های 2، 4 و 6 لیتر بر ساعت برقرار گردید. لازم به ذکر است که در این آزمایش‌ها قطره‌چکان‌ها به صورت منفرد مورد بررسی قرار گرفته و هم‌پوشانی با هم نداشتند. در این آزمایش‌ها حجم کل آب وارد شده به خاک در هر دبی برابر 12 لیتر انتخاب گردید. بدین معنی که دبی‌های 2 لیتر بر ساعت به مدت 6 ساعت، 4 لیتر بر ساعت به مدت 3 ساعت و 6 لیتر بر ساعت به مدت 2 ساعت برقرار شدند تا مقایسه بین ابعاد عمودی و افقی پیشروی جبهه رطوبتی در خاک تحت دبی‌های مختلف ولی با حجم یکسان آب خروجی، میسر گردد.

برای اجرای سیستم آبیاری قطره‌ای، سیستم تامین آب متشکل از دو منبع تهیه گردید که یکی برای تغذیه منبع دیگر و دومی برای ثابت نگه داشتن بار آبی در لوله جانبی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها، از هد ارتفاع مخزن استفاده شده و سیستم تحت فشار نبوده است و قطره‌چکان‌های قابل تنظیم دبی که به صورت غیرجبرانی می‌باشند، مورد استفاده قرار گرفته و دبی قطره چکان‌ها قبل از انجام آزمایش به صورت دستی در مقادیر مشخص 2، 4 و 6 لیتر بر ساعت تنظیم شده‌اند. طرح کلی سیستم مورد استفاده در شکل 2 نشان داده شده است.

در روابط مذکور،  $t$  زمان  $[T]$ ،  $z$  فاصله عمودی جبهه رطوبتی به سمت پایین  $[L]$ ،  $r$  فاصله شعاعی  $[L]$ ،  $a$  معکوس طول مقیاس ماکروسکوپی  $[L^{-1}]$  و  $q$  دبی قطره‌چکان  $[L^3T^{-1}]$  می‌باشند.  $\Delta q$  نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta q = \bar{q} - q_n \quad [11]$$

که در آن  $\bar{q}$  مقدار میانگین رطوبت حجمی در خاک در پشت جبهه رطوبتی  $[L^3L^{-3}]$  و  $q_n$  مقدار رطوبت حجمی اولیه قبل از خیس شدن  $[L^3L^{-3}]$  می‌باشند.

#### معادله بن آشر

بن آشر (1986) فرض نمود که پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای بدون در نظر گرفتن تبخیر از سطح خاک و بدون در نظر گرفتن جذب آب توسط گیاه به صورت نیم‌کره بوده و شعاع نیم‌کره‌های متوالی طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

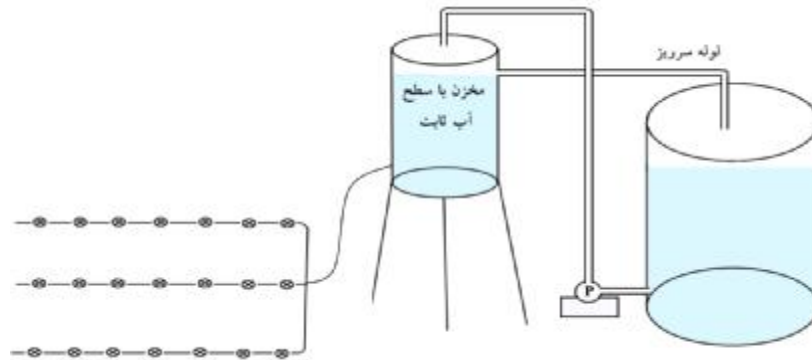
$$R(t) = \left( \frac{3qt}{2p\Delta q} \right)^{1/3} \quad [12]$$

در رابطه 12،  $q$  دبی قطره‌چکان  $[L^3T^{-1}]$ ،  $t$  زمان از شروع آبیاری  $[T]$  بوده و  $\Delta q$  نیز از روابط فیلیپ محاسبه می‌گردد.

#### مواد و روش‌ها

##### انجام آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی

به منظور تعیین پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی در



شکل 2- طرح کلی سیستم آبیاری قطره‌ای

رطوبتی در زمان‌های متفاوت با حفر ترانشه و با استفاده از مقیاس اندازه‌گیری گردید. بازه‌های زمانی از شروع آبیاری که ترانشه‌ها در این زمان‌ها حفر شدند، در جدول 1 ارائه گردیده است.

لازم به ذکر است که دبی قطره‌چکان‌ها به صورت حجمی در ابتدای آزمایش اندازه‌گیری و تنظیم شدند تا اختلاف بین دبی قطره‌چکان‌ها در طول سه لوله جانبی به حداقل برسد. با شروع به کار سیستم، پیشروی جبهه

جدول 1- زمان‌های حفر ترانشه از شروع آبیاری بر حسب دقیقه برای دبی‌های 4.2 و 6 لیتر بر ساعت

زمان حفر ترانشه (دقیقه)						دبی
شماره 6	شماره 5	شماره 4	شماره 3	شماره 2	شماره 1	( $l/hr^{-1}$ )
360	300	240	180	120	60	2
180	150	120	90	60	30	4
120	100	80	60	40	20	6

پذیرفت. همچنین برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک، دستگاه صفحات فشار مورد استفاده قرار گرفت.

#### شبیه‌سازی عددی پیشروی جبهه رطوبتی

به منظور شبیه‌سازی عددی پیشروی جبهه رطوبتی، نرم افزار هایدروس به کار برده شد. محدوده شبیه‌سازی، مستطیلی به عمق 80 سانتی‌متر و عرض 60 سانتی‌متر در پروفیل خاک به صورت محورمتقارن در نظر گرفته شد و شبکه‌بندی محدوده به صورت مثلثی و با فواصل گره‌های یک سانتی‌متری اجرا گردید. در این شبیه‌سازی‌ها 7320 گره برای نشان دادن تمام محدوده

برای شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی، خصوصیات خاک شامل چگالی ظاهری، چگالی حقیقی و رطوبت اولیه قبل از آزمایش اندازه‌گیری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، منحنی دانه‌بندی و منحنی مشخصه رطوبتی خاک تعیین گردیدند. بدین منظور آزمایش استوانه‌های مضاعف برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، آزمایش هیدرومتری برای تعیین بافت خاک و آزمایش تعیین مشخصات فیزیکی خاک با استفاده از سیلندر برای تعیین چگالی ظاهری خاک و پیکنومتر برای تعیین چگالی حقیقی خاک انجام

رطوبتی بنا به توصیه توربورن و همکاران (2003) برای خاک لوم شنی برابر با 5/56 در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در برنامه روش فیلیپ، دو حالت قطره‌چکان سطحی و زیرسطحی امکان‌پذیر می‌باشد (صمدیان فرد 1388).

شبیه‌سازی استفاده شده است. شکل 3 الگوی شبکه استفاده شده در نرم افزار هایدروس را نشان می‌دهد.



#### معیارهای ارزیابی دقت روش‌های عددی و تحلیلی

لازم به ذکر است که خطای بین سه روش محاسباتی و داده‌های مشاهداتی توسط میانگین خطای استاندارد ( $RMSE$ ) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) مورد بررسی قرار گرفته است. فرمول محاسبه میانگین خطای استاندارد و ضریب همبستگی به صورت روابط 13 و 14 می‌باشند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad [13]$$

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)} \quad [14]$$

در روابط 13 و 14،  $x_i$  و  $y_i$  مقادیر فواصل مشاهداتی از قطره‌چکان و محاسباتی توسط سه روش هایدروس، فیلیپ و بن‌آشر و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشند.

شکل 3- الگوی شبکه استفاده شده در نرم افزار هایدروس لازم به ذکر است که شرایط اولیه به صورت مقدار رطوبت حجمی و شرایط مرزی به صورت شار ثابت در محل قطره‌چکان و زهکشی آزاد در مرز پایینی محدوده در نظر گرفته شده است.

#### نتایج و بحث

##### آزمایش‌های خاک‌شناسی

نتایج آزمایش‌های خاک‌شناسی برای تعیین چگالی ظاهری، چگالی حقیقی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و درصد ذرات شن، سیلت و رس در جدول 2 ارائه گردیده است.

##### شبیه‌سازی تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی

به منظور شبیه‌سازی تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی با استفاده از دو روش فیلیپ و بن‌آشر، برنامه‌هایی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Mathematica 7.0 نوشته شدند. با وارد کردن پارامترهای ورودی، جدولی شامل ابعاد عمودی و افقی منحنی‌های پیشروی و همچنین نمودارهای پیشروی به صورت انیمیشن نشان داده می‌شوند. در این مطالعه مقدار ضریب  $a$  برای شبیه‌سازی پیشروی جبهه

## جدول 2- خصوصیات فیزیکی خاک مورد آزمایش

خصوصیات فیزیکی	بافت خاک	چگالی ظاهری خاک ( $g/cm^3$ )	چگالی حقیقی خاک ( $g/cm^3$ )	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	هدایت هیدرولیکی اشباع ( $cm\ day^{-1}$ )
مقدار حاصل از آزمایش	لوم شنی	1/62	2/61	70	18	12	33

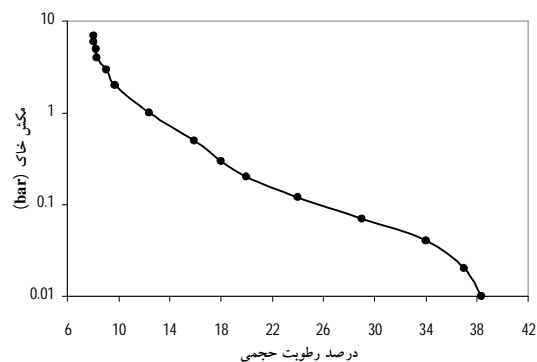
شوند. بدین منظور برازش مدل ون گنوختن با منحنی مشخصه رطوبتی حاصل از آزمایش دستگاه صفحات فشار با نوشتن برنامه‌ای در زبان برنامه‌نویسی Mathematica 7.0 انجام گردیده و پارامترهای مدل حاصل شدند. پارامترهای مدل ون گنوختن در جدول 3 ارائه شده‌اند.

جدول 3- پارامترهای مدل ون گنوختن

پارامتر	$q_r$	$q_i$	$q_s$	$a(cm^{-1})$	$n$
مقدار	0/08	0/11	0/38	0/024	1/8961

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای بعد از اجرا کردن سه مدل برای خاک مورد آزمایش، منحنی‌های پیشروی برای سه دبی 2، 4 و 6 لیتر بر ساعت رسم گردیدند. منحنی‌های مذکور در شکل‌های 5 الی 7 نشان داده شده‌اند.

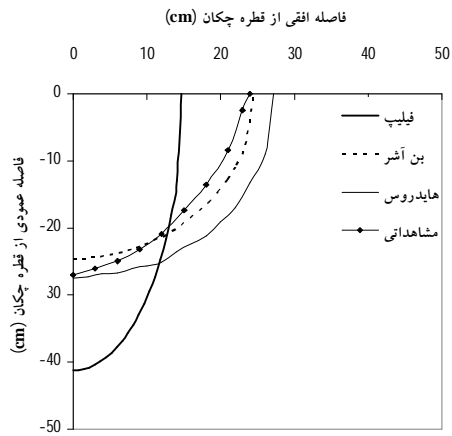
آزمایش‌های دستگاه صفحات فشار برای فشارهای 0/7، 0/3، 1، 2، 3، 4، 5، 6 و 7 بار انجام گردید. در هر مرحله از آزمایش، بعد از گذشت مدت زمان لازم برای به تعادل رسیدن آب در خاک تحت فشار معین، دستگاه باز شده و نمونه در گرمخانه 105 درجه خشک شده و رطوبت نمونه خاک محاسبه و به رطوبت حجمی تبدیل گردیده است. شکل 4 منحنی مشخصه رطوبتی خاک مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



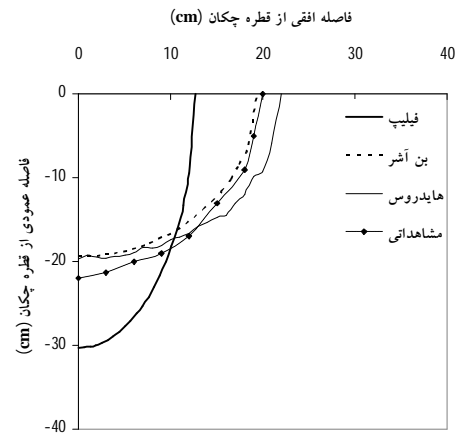
شکل 4- منحنی مشخصه رطوبتی خاک مورد آزمایش

همچنین به منظور شبیه‌سازی عددی پیشروی جبهه رطوبتی، ابتدا باید پارامترهای مدل ون گنوختن محاسبه

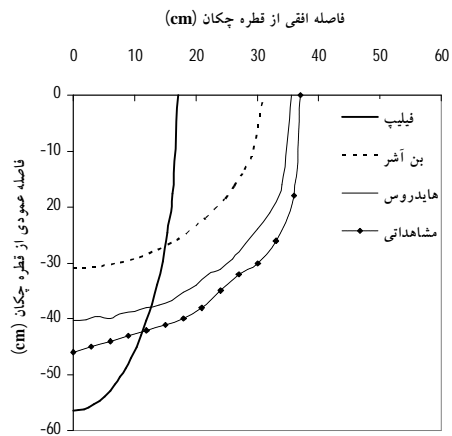




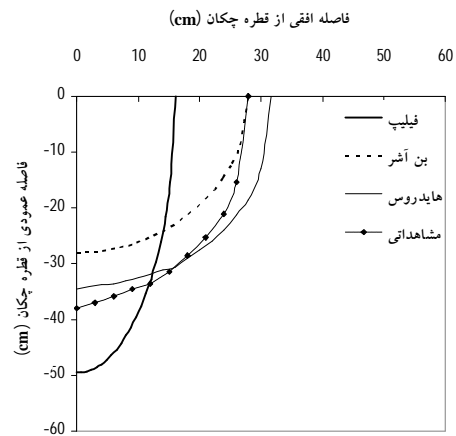
ب- با گذشت 2 ساعت از شروع آبیاری



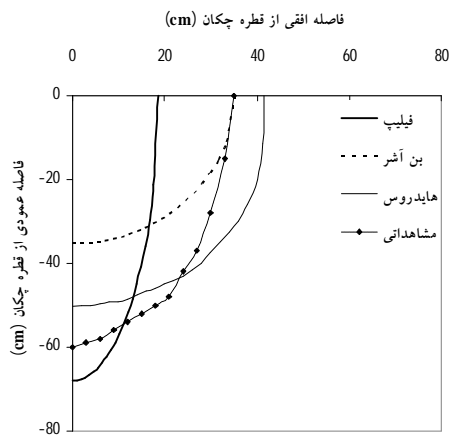
الف- با گذشت 1 ساعت از شروع آبیاری



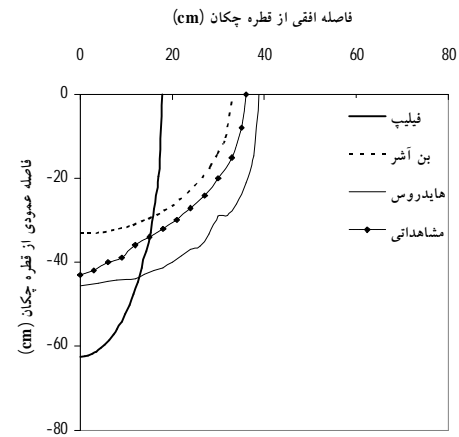
د- با گذشت 4 ساعت از شروع آبیاری



ج- با گذشت 3 ساعت از شروع آبیاری

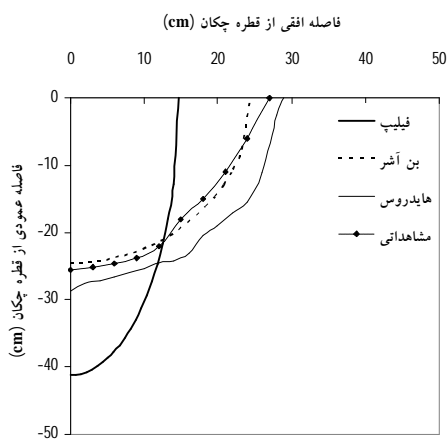


و- با گذشت 6 ساعت از شروع آبیاری

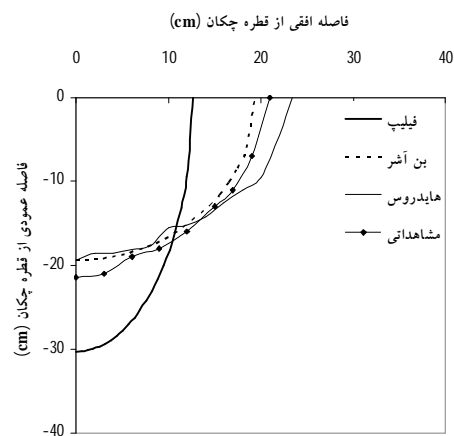


ه- با گذشت 5 ساعت از شروع آبیاری

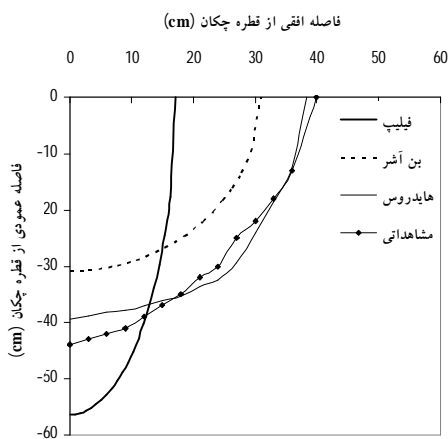
شکل 5- پروفیل‌های پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با دبی 2 لیتر بر ساعت



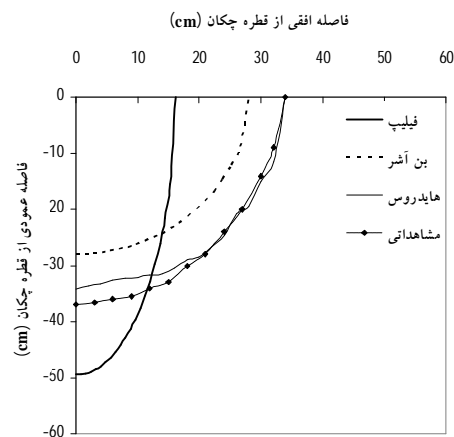
ب- با گذشت 1 ساعت از شروع آبیاری



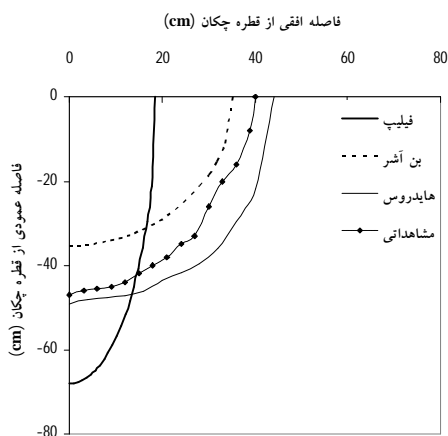
الف- با گذشت 0/5 ساعت از شروع آبیاری



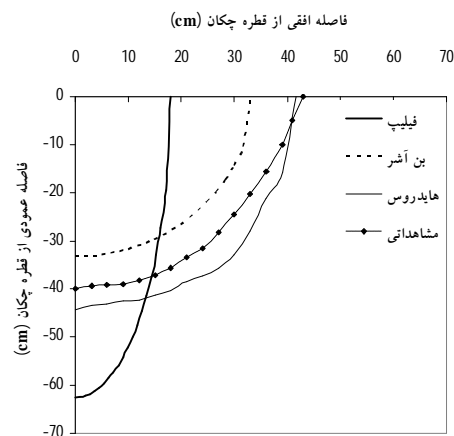
د- با گذشت 2 ساعت از شروع آبیاری



ج- با گذشت 1/5 ساعت از شروع آبیاری

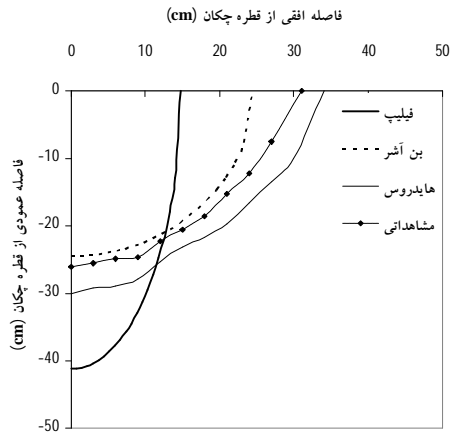


و- با گذشت 3 ساعت از شروع آبیاری

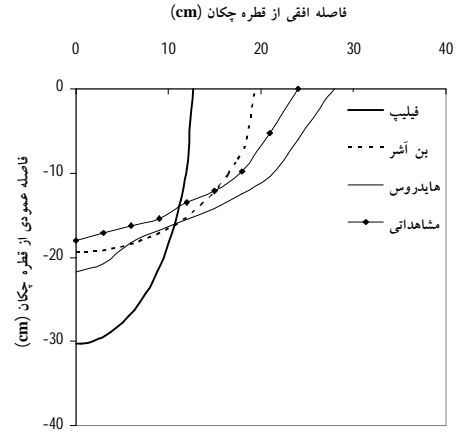


ه- با گذشت 2/5 ساعت از شروع آبیاری

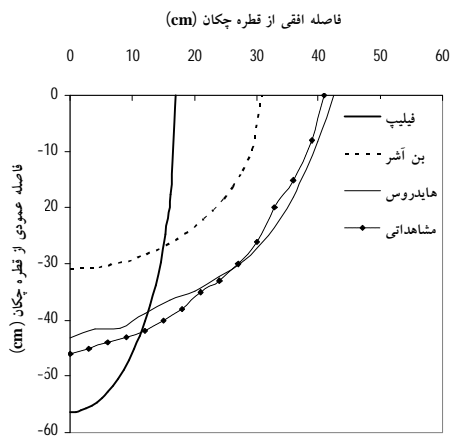
شکل 6- پروفیل‌های پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با دبی 4 لیتر بر ساعت



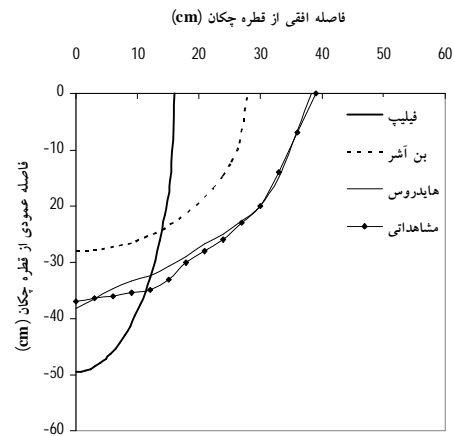
ب- با گذشت 40 دقیقه از شروع آبیاری



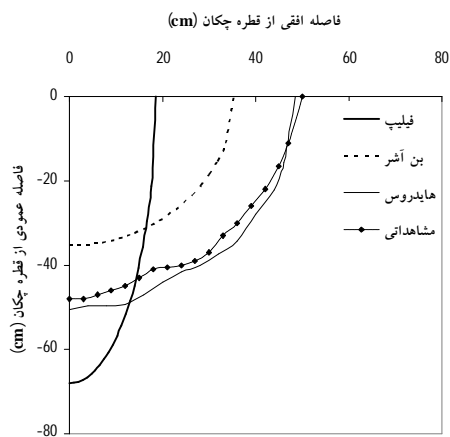
الف- با گذشت 20 دقیقه از شروع آبیاری



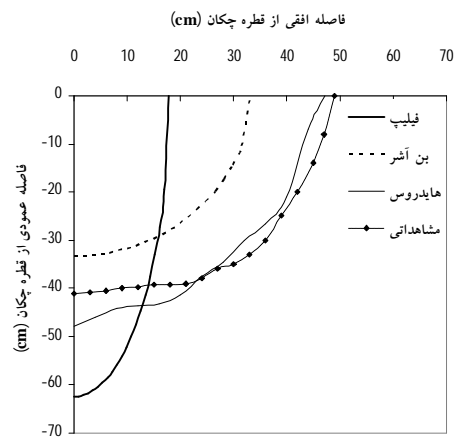
د- با گذشت 80 دقیقه از شروع آبیاری



ج- با گذشت 60 دقیقه از شروع آبیاری



و- با گذشت 120 دقیقه از شروع آبیاری

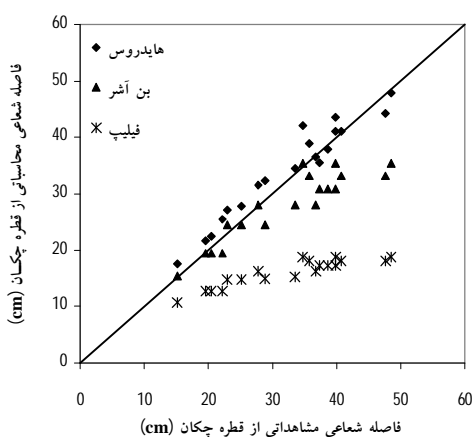


ه- با گذشت 100 دقیقه از شروع آبیاری

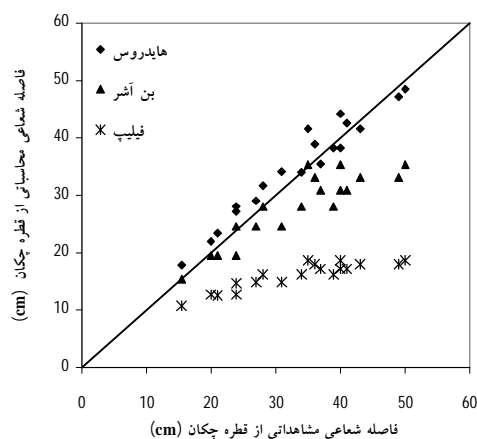
شکل 7- پروفیل‌های پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با دبی 6 لیتر بر ساعت

نسبت به محور  $x$  ها در امتداد سطح خاک بر اساس معیارهای آماری میانگین خطای استاندارد و ضریب تبیین مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که نمودار پراکنش فواصل شعاعی مشاهداتی و محاسباتی پروفیل‌های پیشروی جبهه رطوبتی در زوایای مختلف از محور  $x$  ها و با در نظر گرفتن تمامی دبی‌ها (2، 4 و 6 لیتر بر ساعت) در شکل 8 رسم گردیده‌اند.

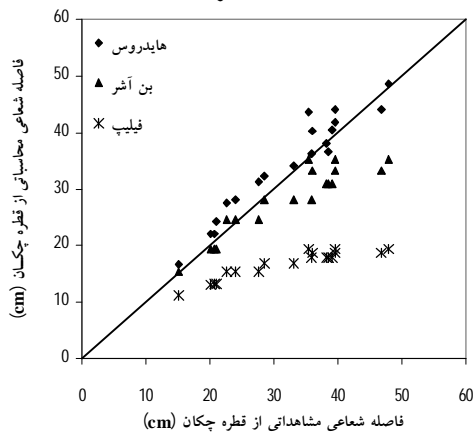
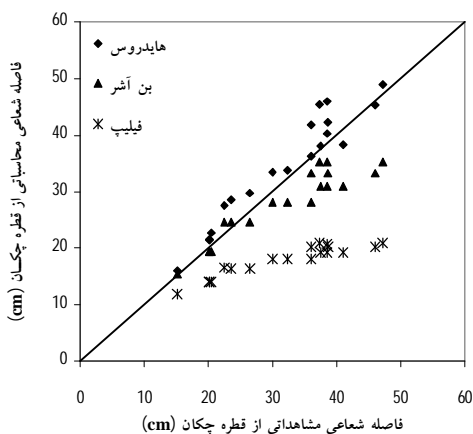
بررسی دقت شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیلی در زوایای مختلف از محور  $x$  ها به منظور بررسی دقت شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیلی، فاصله جبهه پیشروی در دستگاه محوره‌ای قطبی با مرکز منطبق بر محل قطره‌چکان به ازای زوایای مختلف 0، 10، 20، 30، 40، 50، 60، 70، 80 و 90 درجه



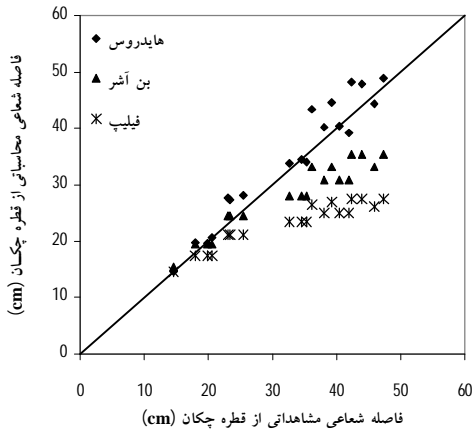
ب- زاویه 10 درجه



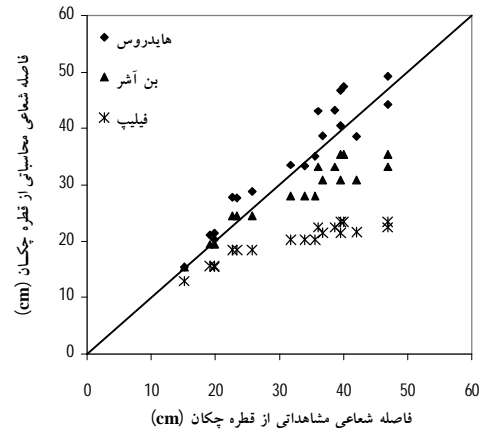
الف- زاویه صفر درجه



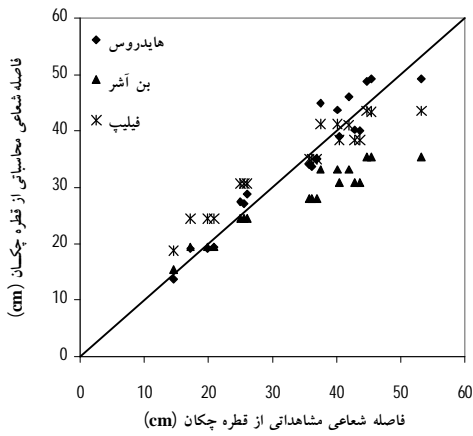
شکل 8- نمودار پراکنش فواصل شعاعی مشاهداتی و محاسباتی پروفیل‌های پیشروی جبهه رطوبتی در زوایای مختلف از محور  $x$  ها



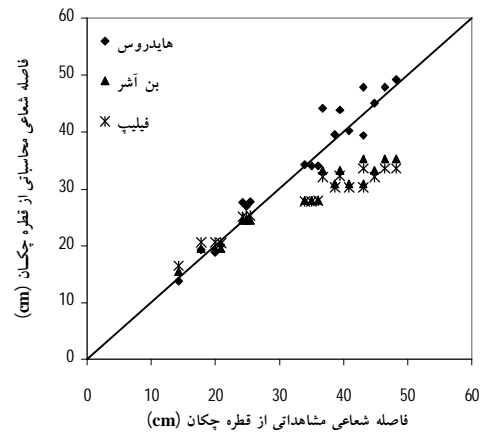
و- زاویه 50 درجه



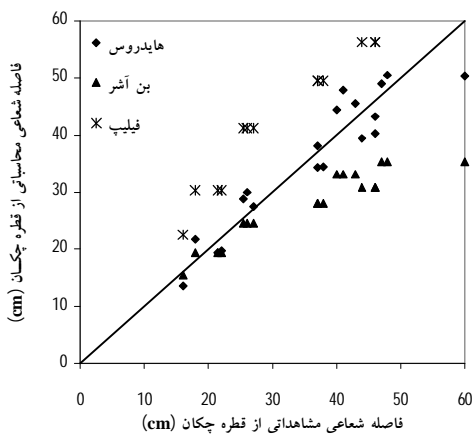
ه- زاویه 40 درجه



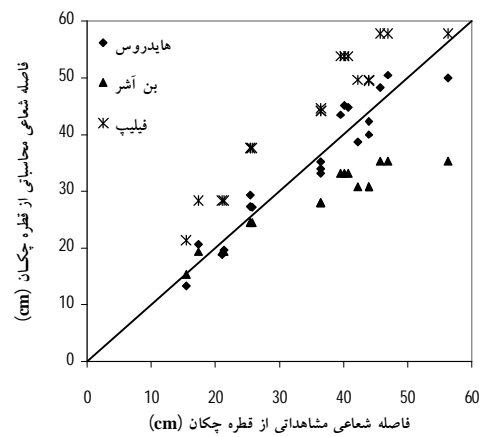
ح- زاویه 70 درجه



ز- زاویه 60 درجه



ی- زاویه 90 درجه



ط- زاویه 80 درجه

مقادیر میانگین خطای استاندارد و ضریب همبستگی حاصل از سه روش فیلیپ، بن‌آشر و هایدروس در زوایای مختلف از محور  $x$  ها و در حالت متوسط کل برای پروفیل‌های پیشروی جبهه رطوبتی و با در نظر گرفتن تمامی دبی‌ها (2، 4 و 6 لیتر بر ساعت) در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 4- مقادیر میانگین خطای استاندارد و ضریب همبستگی در زوایای مختلف از محور  $x$  ها و در حالت متوسط کل

برای پروفیل‌های پیشروی جبهه رطوبتی

هایدروس		بن‌آشر		فیلیپ		مقدار زاویه از محور $x$ ها (درجه)
$R^2$	RMSE (cm)	$R^2$	RMSE (cm)	$R^2$	RMSE (cm)	
0/971822	2/8266	0/894995	7/41144	0/894741	19/039	0
0/968304	3/01784	0/913114	6/44691	0/909322	17/9533	10
0/962816	3/33119	0/925651	6/05566	0/928001	16/9884	20
0/959048	3/7241	0/934375	5/90686	0/934421	15/7255	30
0/952681	3/77478	0/944172	6/27329	0/939786	14/188	40
0/967467	3/24175	0/961985	6/76111	0/953447	11/7415	50
0/97133	2/78369	0/967169	7/27078	0/962336	8/0667	60
0/959884	3/15945	0/960249	8/17338	0/958628	4/32526	70
0/954998	3/33261	0/953034	8/95767	0/954683	9/80827	80
0/938629	4/06519	0/943299	10/3201	0/944609	14/6708	90
0/9607	3/32572	0/93980	7/35772	0/9378	13/25067	متوسط کل

است. نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس روش‌های محاسباتی در جدول 5 ارائه شده است.

همچنین با بررسی‌های آماری که انجام گرفت، مشاهده گردید که اختلاف بین روش‌های شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی در سطح احتمال 1% معنی‌دار

جدول 5- تجزیه واریانس روش‌های شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	واریانس	آزمون فیشر
روش‌های محاسباتی	9146/51	3	3040/84	28/7512**
اشتباه آزمایشی	80167/9	756	106/042	-
کل	89314/5	759	-	-

که نتایج به دست آمده از این آزمون در شکل 9 ارائه گردیده است.

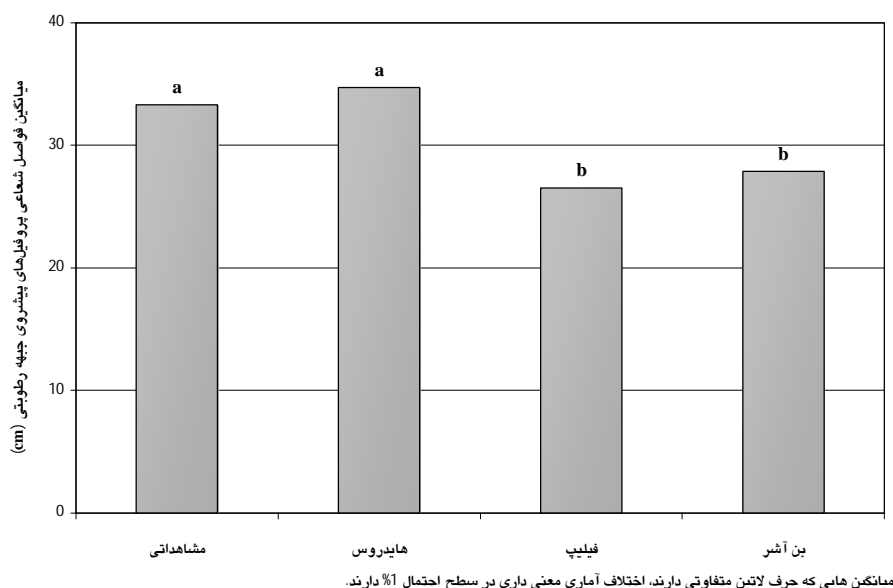
همانطوری که از شکل 9 مشخص است، روش هایدروس اختلاف معنی‌داری با داده‌های مشاهداتی در سطح احتمال 1% نداشته ولی روش‌های فیلیپ و بن‌آشر

بدین ترتیب با مشخص شدن معنی‌دار بودن اختلاف بین روش‌های هایدروس، فیلیپ و بن‌آشر در شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی، آزمون  $LSD$  در سطح احتمال 1% برای مقایسه میانگین‌ها انجام پذیرفت

روش‌های دیگر داشته و با داشتن ضریب همبستگی بالا و خطای کم، روشی مناسب در شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای می‌باشد. اسکگز و همکاران (2004) نیز اظهار داشتند که شبیه‌سازی‌های هایدروس از آبیاری قطره‌ای تطابق خوبی با داده‌های آزمایشی دارد. همچنین در مورد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، دقت شبیه‌سازی‌های هایدروس توسط پروونزانو (2007) مورد تایید قرار گرفته است. بعد از مدل هایدروس، روش بن‌آشر در مقایسه با روش فیلیپ دارای ضریب همبستگی بالا و خطای کم می‌باشد. همچنین روش فیلیپ به دلیل برآورد زیاد عمق جبهه رطوبتی، دارای خطای زیاد نسبت به دو روش دیگر می‌باشد.

در سطح احتمال 1% اختلاف معنی‌داری با داده‌های مشاهداتی دارند.

در نهایت با استفاده از شکل‌های 8 و 9 و جداول 4 و 5 می‌توان نتیجه گرفت که مدل هایدروس در تمامی زوایا با داشتن حداقل خطای محاسباتی در مقایسه با روش‌های تحلیلی فیلیپ و بن‌آشر بهترین روش در شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای می‌باشد. بعد از مدل هایدروس، روش بن‌آشر با داشتن کمی خطا در مرتبه دوم قرار داشته و روش فیلیپ نیز فقط در زوایای 60 و 70 درجه خوب عمل می‌کند، چون این زوایا محل برخورد منحنی‌های حاصل از روش فیلیپ با منحنی‌های مشاهداتی می‌باشند. همچنین مدل هایدروس در حالت متوسط کل برتری خاصی نسبت به



شکل 9- میانگین روش‌های شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی

منظور محاسبه پارامترهای مدل ون‌گنوختن، منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه صفحه فشار تعیین شد. بعد از انجام آزمایش‌های خاک‌شناسی، برنامه‌هایی برای حل روابط فیلیپ و بن‌آشر با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Mathematica 7.0 نوشته شد و

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، ابتدا مشخصات فیزیکی خاک لوم‌شنی مورد آزمایش، تعیین گردید. سپس به

پروفیل‌های پیشروی جبهه رطوبتی نشان دادند که روش بن‌آشر در دبی‌های کم دقت بالاتری نسبت به دبی‌های زیاد دارد. همچنین در زمان‌های ابتدایی آبیاری پروفیل‌های پیشروی جبهه رطوبتی همگرایی بیشتری با روش بن‌آشر دارند، ولی با گذشت زمان و بیشتر شدن زمان آبیاری منحنی‌های مشاهداتی از منحنی‌های روش بن‌آشر فاصله گرفته و به منحنی‌های مدل هایدروس نزدیک می‌شوند. ولی در حالت کلی و با در نظر گرفتن سه دبی و زمان‌های متفاوت از شروع آبیاری، مدل هایدروس دقت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر دارد.

نرم افزار هایدروس برای شبیه‌سازی‌های عددی مورد استفاده قرار گرفت. با تحلیل و اجرای مدل‌های تحلیلی و عددی، منحنی‌های پیشروی جبهه رطوبتی حاصل شدند. با محاسبه فاصله جبهه پیشروی در مختصات قطبی در زوایای 0، 10، 20، 30، 40، 50، 60، 70، 80 و 90 درجه، مقایسه بین روش‌های تحلیلی و عددی میسر گردید. نتایج نشان دادند که مدل هایدروس با داشتن میانگین خطای استاندارد 3/32572 و ضریب همبستگی 0/9607 و تطابق خوب با داده‌های مشاهداتی در بین مدل‌های مذکور، بهترین روش در برآورد منحنی‌های پیشروی می‌باشد.

#### منابع مورد استفاده

- صمدیان فرد س، 1388. شبیه‌سازی عددی و تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- علیزاده الف، 1380. اصول و عملیات آبیاری قطره‌ای. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه امام رضا.
- Ben-Asher J, 1986. Infiltration and water extraction from trickle irrigation source: the effective hemisphere model. *Soil Science Society of American Journal* 50 (4): 882-887.
- Ben-Asher J, Lomen DO and Warrick AW, 1978. Linear and non-linear models of infiltration from a point source. *Soil Science Society of American Journal* 42: 3-6.
- Chen JM, Tan YC, and Wu YZ, 2006. A study of the infiltration of trickle irrigation. 7th International Micro Irrigation Congress. September 10 – 16, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Philip, RJ, 1984. Travel time from buried and surface infiltration point sources. *Water Resource Research* 20(7):990-994.
- Provenzano G, 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 133(4): 342-349.
- Simunek J, Van Genuchten, M Th and Senja 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.
- Skaggs TH Trout, TJ Simunek J and Shouse PJ, 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 130(4): 304-310.
- Thorburn PJ, Cook FJ, and Bristow KL, 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science* 22: 121-127.
- Van Genuchten M Th, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal* 44: 892-898.