

**Research Article****Distribution of Water in Soil under Drip Irrigation by Moment Analysis using Different Discharges**S Moslemi<sup>1</sup>, AH Nazemi<sup>\*2</sup>, AA Sadraddini<sup>3</sup>, S Samadianfard<sup>4</sup>, F Mikaeili<sup>5</sup>

Received: April 30, 2022

Accepted: July 31, 2022

Revised: July 9, 2022

Published online: September 22, 2024

1-M.Sc., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

2-Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

3-Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

4-Asoc. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

5-M.Sc. student, Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, Email: ahnazemi@yahoo.com

**Abstract****Background and Objectives**

Water shortage and the need for its optimal use in arid and semi-arid regions, including Iran, has led water officials and farmers to use modern irrigation systems, such as drip irrigation with the aim of making optimal use of water resources. Drip irrigation has been welcomed in most parts of the world due to its high efficiency and the possibility of irrigation in different environmental conditions. The most important reason for the superiority of drip irrigation over other irrigation methods is the controllable amount of water for each plant. Drip irrigation is a method in which water is poured out of the net at low pressure through an orifice or device called an emitter and dripped into the bottom of the plant. This irrigation system, like other methods, requires accurate knowledge of the parameters affecting it to achieve the desired efficiency. One of the most important parameters for the irrigation system is the distribution of moisture in the soil and in fact the shape of the moist bulb. Therefore, knowledge of how to distribute water in the soil is essential for the proper design and management of subsurface drip irrigation systems. Since testing is very difficult and time consuming to detect the shape of moisture distribution in the soil, the use of numerical and analytical simulation can be an effective and efficient way to design these systems.

**Methodology**

In order to determine the progress of the moisture front in drip irrigation, first the soil texture type and physical properties of the soil were determined. It should be noted that the emitter flow rate was measured and adjusted in volume at the beginning of the test to minimize the difference between the emitter flows along the three side tubes. Evaluation experiments were performed with three outflows of 2, 4 and 6 liters per hour. With the start of the system, the progress of the moisture front at different times was measured by digging a trench using a scale. Numerical simulation of moisture front progress was performed using HYDRUS model based on Richard equation and analytical simulation was performed using Moment Analysis. HYDRUS software was used to numerically simulate the progress of the moisture front. The simulation range was considered to be 100 cm by 100 cm on the two-dimensional plane. In these simulations, 3956 nodes are used to represent the entire simulation range and also, relevant equations were used to calculate the two-dimensional spatial Moment of the wetting pattern.



## Findings

The simulations show that the initial volumetric moisture content is 0.11 and the saturation volumetric moisture content is 0.380 and the water dispersion rate increases over time on the x and z axes. With increasing flow, the maximum dispersion is in the x-axis, which occurs in flow of 6 liters per hour. The result for flow of 6 liters per hour based on the data used is slightly higher than the desired value. The reason why the value of  $M_{00}$  in the flow rate of 6 liters per hour is higher than expected, is that in the simulation flow rate of 6 liters per hour change in the size of the inlet diameter and the amount of flux changes the amount of water entering the soil and moistens a large volume of soil. Due to the different amount of moisture applied to the area at different times, the value of  $z_c, \sigma_x^2, \sigma_z^2$  is different and has caused a change in the size of the oval in different flows. The increase in the size of the ovals indicates the high dispersion of water in that area. The results showed that the Moment analysis was able to express the position of the center of mass of water distributed in the soil with correlation coefficient of 0.986 in linear mode and 0.982 in logarithmic mode. By comparing the values of diameter and depth obtained from the HYDRUS and the drawn ovals, it can be concluded that both methods provide close results. The accuracy of the Moment analysis method in simulating different types of moisture patterns resulting from drip irrigation under different flows with the use of different volumes of water is similar to the HYDRUS model and therefore it is possible to use this feature to predict the pattern of moisture from a certain flow using a specific volume of water.

## Conclusion

In this study, the accuracy of Moment analysis in simulating various moisture patterns resulting from drip irrigation under different flows with the use of different volumes of water was investigated and the possibility of using this feature to predict the pattern of moisture from a given flow using a specific volume of water checked. In order to investigate the Moment of the amount of water distributed in the soil by subsurface drip irrigation, simulation was performed by two-dimensional HYDRUS software for three discharges of 2, 4 and 6 liters per hour with an inlet water volume of 12 liters. Then, using the results of simulation of moisture distribution range by a programming language including MATLAB software, and by calculating the Moments, it was determined that the Moments are able to express the position of the center of mass of water distributed in the soil and how it is distributed relative to x and z axes. The increase in the size of the ovals indicates that more water is distributed in that area. Comparing the diameters and depths of the moisture front between the simulated HYDRUS model and the Moment analysis model, it was found that the Moment analysis is an efficient way to study the distribution of water moisture by drip irrigation and this method can be used as an alternative input to estimate parameters.

**Keywords:** Drip irrigation, Emitter, HYDRUS, Moment analysis, Wetting front

## مقاله پژوهشی

### توزیع آب در خاک تحت آبیاری قطره‌ای توسط تحلیل گشتاور با کاربرد دبی‌های مختلف

سمیرا مسلمی<sup>۱</sup>، امیرحسین ناظمی<sup>۲\*</sup>، علی‌اشرف صدرالدینی<sup>۳</sup>، سعید صمدیان فرد<sup>۴</sup>، فاطمه میکائیلی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۸ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز
- ۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز
- ۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز
- ۴- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز
- ۵- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [ahnazemi@yahoo.com](mailto:ahnazemi@yahoo.com)

#### چکیده

در طراحی سیستم آبیاری قطره‌ای، تحلیل گشتاور یک روش با کارآمدی بالا، جامع و گسترده برای توصیف توزیع مکانی آب است. در واقع، مقادیر آب موجود در یک سطح معین از خاک تابع مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی خاک است که تخمین آن نیازمند تعیین داده‌های گسترده‌ای می‌باشد که مجموعه این عوامل به صورت کلی می‌تواند با گشتاورهای درجه اول و دوم آب خاک بیان گردد. در این تحقیق، به منظور ارزیابی و تعیین قابلیت روش گشتاور در برآورد مقادیر آب توزیع شده در خاک توسط آبیاری قطره‌ای سطحی، آزمایش‌های ارزیابی با سه دبی خروجی ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت به کار گرفته شد. برای شبیه‌سازی عددی جریان آب در خاک نرم افزار Hydrus-2D اجرا گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای سه دبی با لحاظ زمان‌بندی متناسب با حجم آب کاربردی ثابت ۱۲ لیتر، برای تعیین محدوده و نحوه توزیع رطوبت در خاک به کار برده شد. ابتدا صحت‌سنجی مقادیر حاصله بر مبنای مقایسه با آزمایش‌های تجربی انجام شده و محاسبه مقادیر گشتاورهای مربوط به نحوه توزیع آب در خاک در نرم افزار Matlab به انجام رسید. نتایج نشان داد که گشتاورها قابلیت بیان موقعیت مرکز جرم آب توزیع شده در خاک را با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۸۶ در حالت خطی و ۰/۹۸۲ در حالت لگاریتمی و نحوه توزیع آن نسبت به محورهای x و z را دارا می‌باشند. محدوده توسعه رطوبتی خاک با تطبیق بهینه یک بیضی بر مبنای مقادیر گشتاورهای حاصله شبیه‌سازی گردید. در نهایت نتیجه گرفته شد که مدل تحلیل گشتاور با ارائه نتایج مشابه مدل Hydrus روشی مناسب برای مطالعه نحوه توزیع رطوبت آب در خاک تحت آبیاری قطره‌ای است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، تحلیل گشتاور، جبهه رطوبتی، قطره چکان، مدل Hydrus

## مقدمه

آبیاری قطره‌ای و در هر بافت خاک چگونگی توزیع آب در خاک ممکن است متفاوت باشد. اطلاعات کافی از نحوه توزیع جریان آب در خاک به صورت افقی و عمودی در تعیین عمق نصب لوله‌های لترال، فاصله قطره‌چکان‌ها و چگونگی تنظیم شدت جریان خروجی از قطره‌چکان‌ها نقش مهمی دارد (ژنجی و همکاران ۲۰۱۷). بنابراین آگاهی از نحوه توزیع آب در خاک جهت طراحی و مدیریت صحیح سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی امری ضروری است. از آنجایی که انجام آزمایش، برای تشخیص شکل توزیع رطوبت در داخل خاک بسیار سخت و وقت‌گیر می‌باشد، لذا استفاده از شبیه‌سازی عددی می‌تواند روشی مؤثر و کارا در امر طراحی این سیستم‌ها باشد. از جمله این مدل‌ها، مدل پیشرفته هایدروس دو بعدی<sup>۱</sup> است که قادر به شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در شرایط اشباع و غیراشباع در خاک می‌باشد. روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای توصیف توزیع آب در خاک شامل هایدروس، مدل‌های تجربی مانند آنالیز ابعادی، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون وجود دارند که در زیر به برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه‌ها اشاره می‌شود: کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) دو آزمایش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک لومرسی تحت شرایط آزمایشگاه و مزرعه انجام دادند. آنها با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای هر دو درصدهای رطوبت خاک و ابعاد ناحیه خیس شده نشان دادند که دقت Hydrus بسیار بالا بوده و می‌توان از آن به عنوان ابزاری مفید که قادر به بهینه کردن همه فاکتورهای اصلی در امر طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است، استفاده

کمبود آب و لزوم مصرف بهینه از آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله در ایران، مسئولان امور آب و کشاورزان را با هدف بهره برداری بهینه از منابع آب به سمت استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری، مانند آبیاری قطره‌ای سوق داده است. آبیاری قطره‌ای به دلیل راندمان بالا و امکان آبیاری در شرایط محیطی مختلف و برای اکثر گیاهان در بیشتر نقاط جهان مورد استقبال قرار گرفته است. مهم‌ترین دلیل برتری آبیاری قطره‌ای نسبت به سایر روش‌های آبیاری، قابل کنترل بودن مقدار آب برای هر گیاه است (علیزاده ۱۹۹۸). روش‌های جدید آبیاری متمرکز بر آبیاری گیاه و نه بر آبیاری زمین است. اکثراً چنین تصور می‌شود که ریشه‌های گیاه برای دریافت آب به اعماق خاک یا اطراف گسترش پیدا می‌کند حال آنکه چنین نبوده و ریشه گیاه دنبال آب حرکت نمی‌کند بلکه هر جا رطوبت وجود داشته باشد گیاه نیز در همان جا رشد می‌کند. آبیاری قطره‌ای عبارت است از روشی که طی آن آب با فشار کم از روزنه یا وسیله‌ای به نام قطره چکان<sup>۱</sup> از شبکه خارج و به صورت قطراتی در پای بوته ریخته می‌شود. این سیستم آبیاری نیز مانند دیگر روش‌ها، برای حصول راندمان مورد نظر نیازمند شناخت دقیق پارامترهای مؤثر بر آن است. از جمله مهم‌ترین پارامترهای تاثیر گذار بر این سیستم آبیاری، نحوه توزیع رطوبت در خاک و در واقع شکل پیاز رطوبتی<sup>۲</sup> است. با توجه به این امر شکل پیاز رطوبتی تحت تاثیر عوامل زیادی چون بافت خاک، شدت پخش آب، زمان آبیاری و شیب زمین می‌باشد. برای هر سیستم

<sup>3</sup> Hydrus-2D<sup>1</sup> Emitter<sup>2</sup> Wetting Front

مدل‌سازی مساحت خیس‌شده پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از آنالیز ابعادی، رگرسیون غیر خطی (NLR)<sup>۲</sup> و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)<sup>۳</sup> پرداختند. نتایج حاصل بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برتری مدل ANN و NLR نسبت به DA را نشان داد و چنین بیان کردند که این مدل‌ها برای اهداف طراحی می‌تواند در انتخاب دقیق فاصله بین قطره‌چکان‌ها و لترال‌ها و همچنین عمق مناسب قطره‌چکان‌ها مفید باشد. صمدیان‌فرد و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی پتانسیل برنامه‌نویسی بیان ژن<sup>۴</sup> و مدل درختی M5 در شبیه‌سازی الگوی خیس شدن خاک تحت آبیاری قطره‌ای سطحی پرداختند و گزارش کردند که در برآورد شعاع و عمق الگوهای خیس شده، مدل درختی M5 نسبت به GEP از عملکرد بهتری برخوردار بود. شیری و همکاران (۲۰۲۰) به شبیه‌سازی ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی (RF)<sup>۵</sup> پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با استثنائات جزئی، هر دو مدل GEP و RF توانایی خوبی در مدل‌سازی ابعاد جبهه مرطوب در تمام تیمارهای انجام‌شده ارائه کردند. کیسی و همکاران (۲۰۲۱) به مدل‌سازی توزیع مجدد جبهه رطوبتی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای با استفاده از سیستم عصبی فازی - تطبیقی بهبود یافته با الگوریتم ازدحام پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که مدل مذکور، دقت در تخمین قطر توزیع مجدد را در حالت عمودی و افقی بهبود می‌بخشد. کریمی و همکاران (۲۰۲۲) توزیع مجدد رطوبتی آبیاری قطره‌ای را با استفاده از

کرد. صمدیان‌فرد و همکاران (۲۰۱۱) با شبیه‌سازی عددی و تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل Hydrus و دو روش فیلپ و بن آشر نشان دادند که مدل Hydrus-2D با میانگین خطای مطلق ۳/۳۲ و با ضریب همبستگی ۰/۹۶ تطابق بهتری با داده‌های مشاهداتی داشته و بهترین روش در شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای می‌باشد. زندخواه و خالدیان (۲۰۱۳) با بررسی اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی در شبیه‌سازی با مدل Hydrus-2D به این نتیجه رسیدند که در شبیه‌سازی با این مدل، لحاظ نمودن تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک، نقش مهمی در بهبود نتایج شبیه‌سازی ایفا می‌کند، به ویژه این تغییرات بعد از اولین آبیاری بسیار مشهود می‌باشد. فرج زاده (۲۰۱۴) با شبیه‌سازی آبیاری قطره‌ای نبضی و تعیین قطر و عمق خیس شده و مناسب‌ترین نسبت قطع و وصل در آن، نشان داد که با توجه به معیارهای آماری، مدل Hydrus دارای دقت قابل قبول و مناسب در شبیه‌سازی الگوی رطوبتی ایجاد شده در جریان نبضی و پیوسته است، به طوری که دقت مدل Hydrus با افزایش حجم آب کاربردی بیشتر می‌شود. کریمی و همکاران (۲۰۱۵) به ارائه روابطی برای پیش‌بینی الگوی توزیع مجدد رطوبت خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به کمک قضیه  $\pi$  باکینگهام و آنالیز ابعادی (DA)<sup>۱</sup> پرداختند. مقایسه نتایج بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان داد که این مدل‌ها با دقت بالایی الگوی توزیع مجدد را پس از پایان آبیاری پیش‌بینی می‌کند. کریمی و همکاران (۲۰۲۰) به

<sup>4</sup> Gene Expression Programming

<sup>5</sup> Random forest

<sup>1</sup> Dimensional Analysis

<sup>2</sup> Non- Linear Regression

<sup>3</sup> Artificial Neural Network

استفاده قرار گیرد. بررسی‌های منابع موجود نشان می‌دهد که روش تحلیل گشتاور برای انواع بافت خاک در آبیاری‌های قطره‌ای سطحی و زیرسطحی توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است و در این تحقیقات دبی ورودی واحدی در آزمایشات لحاظ شده و اثر تغییر شدت جریان ورودی روی توزیع رطوبت در خاک و عملکرد روش تحلیل گشتاور با لحاظ تغییرات دبی مور ارزیابی قرار نگرفته است.

در پژوهش حاضر، توزیع آب در خاک تحت آبیاری قطره‌ای با لحاظ سه نوع دبی متفاوت با استفاده از تحلیل گشتاورها<sup>۱</sup> تخمین زده شده است. مقادیر آب موجود در یک سطح معین از خاک تابع مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی خاک است که تخمین آن نیازمند تعیین داده‌های گسترده‌ای می‌باشد که مجموعه این عوامل به صورت کلی می‌تواند با گشتاورهای درجه اول و دوم آب خاک بیان گردد. بنابراین، روش تحلیل گشتاورها می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی برای تعیین نحوه توزیع رطوبت در خاک مورد استفاده قرار گیرد. بدین منظور، ابتدا نحوه توزیع آب در خاک تحت شرایط مختلف با نرم‌افزار Hydrus شبیه‌سازی گردید. سپس اطلاعات حاصله برای محاسبه مقادیر گشتاورها، برآورد و تخمین نحوه توزیع آب در خاک بر مبنای مقادیر گشتاورها به‌کار گرفته شده است. شناخت نحوه رفتار و حرکت آب در خاک با استفاده از روش گشتاورها در شدت‌های متفاوت جریان ورودی هدف اصلی این بررسی است. در این روش تحقیق برخلاف روش‌های قدیمی، که نیاز به اطلاعات دقیق در مورد توزیع آب دارند، تحلیل گشتاور می‌تواند توزیع مقدار آب را به طور

رویکردهای مبتنی بر رگرسیون بررسی کردند و نتایج حاکی از عملکرد مناسب رگرسیون غیر خطی در زمینه مدل‌سازی پیاز رطوبتی بود. صولت و همکاران (۲۰۲۱) به مدل‌سازی پیاز رطوبتی در اراضی شیبدار با استفاده از رویکردهای عددی و مبتنی بر رگرسیون پرداختند و نتایج نشان داد که با استفاده از رگرسیون غیرخطی میزان خطا نسبت به Hydrus-2D کاهش یافت. لازاوویچ و همکاران (۲۰۰۷) در سه بافت خاک لومی، لوم شنی و شنی تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی روش تحلیل گشتاور را برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک به‌کار گرفتند و نتایج حاصله را در توصیف حجم و گسترش رطوبت قابل قبول و دقت خوب روش تحلیل گشتاور را نشان دادند. لازاوویچ و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی به بررسی توزیع آب زیر سطحی از جویچه‌ها توسط تحلیل گشتاور پرداختند. در این تحقیق تحلیل گشتاور ابزاری قدرتمند را ارائه داد که می‌تواند برای تکمیل شاخص‌های مدیریت آبیاری مورد استفاده قرار گیرد و استفاده از روش تحلیل گشتاور می‌تواند مدیریت آبیاری را بهبود می‌دهد و یک روش کاربردی در توزیع آب در جویچه‌ها می‌باشد. اسپیرلینگ و لازاروویچ (۲۰۱۰) با کاربرد تحلیل گشتاور به ارزیابی مساحت خیس‌شده توسط یک قطره‌چکان در طی و بعد از نفوذ پرداختند. نتایج نشان داد که گشتاور محاسبه شده به سادگی و با کارآمد بالا می‌تواند توزیع آب در خاک را توصیف کند. کاظمی و همکاران (۲۰۲۱) با کاربرد تحلیل گشتاور برای مدل‌سازی توزیع آب در خاک در آبیاری جویچه‌ای چنین اظهار داشتند که نتایج حاصل از تحلیل گشتاور می‌تواند به عنوان یک پایگاه بزرگ داده‌ای مورد

<sup>1</sup> Moment Analysis

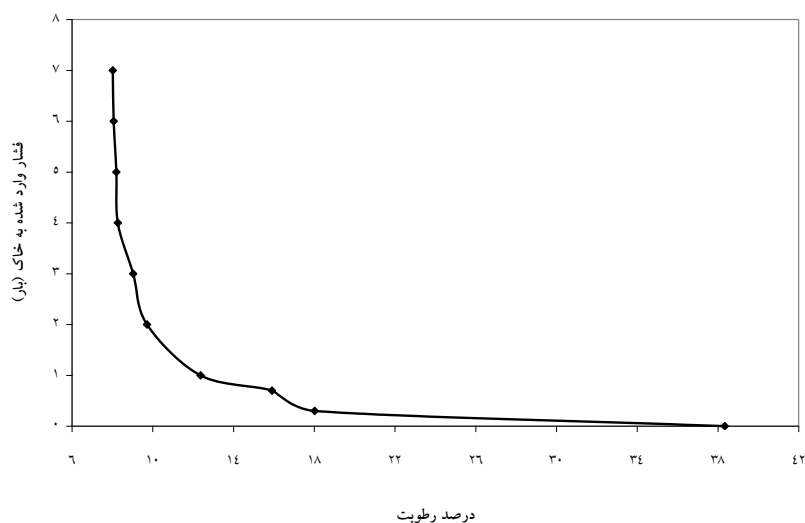
اشباع خاک، آزمایش هیدرومتری برای تعیین بافت خاک و آزمایش تعیین مشخصات فیزیکی خاک با استفاده از سیلندر برای تعیین چگالی ظاهری خاک و پیکنومتر برای تعیین چگالی حقیقی خاک و همچنین برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک، دستگاه صفحات فشار برای فشارهای ۰/۳، ۰/۷، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ بار انجام گرفته است. در هر مرحله 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 ۱۰۵ درجه خشک شده و رطوبت نمونه خاک محاسبه و به رطوبت حجمی تبدیل گردیده است. شکل ۱ منحنی مشخصه رطوبتی خاک مورد آزمایش را نشان می‌دهد (صمدیان فرد ۲۰۰۹). به منظور اندازه گیری توزیع رطوبت در خاک، آزمایش‌ها با سه نوع قطره چکان با دبی‌های ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت انجام گرفت (صمدیان فرد ۲۰۰۹). جدول ۱ زمان‌های مربوط به حفر ترانشه جهت برداشت نمونه‌های خاک و اندازه‌گیری رطوبت خاک را نشان می‌دهد. در هر ترانشه تعداد نمونه برداشتی از خاک در حدود ۲۰ عدد و در مجموع تقریباً ۳۸۰ نمونه خاک برای تعیین میزان رطوبت در پروفیل خاک در زمان‌های مختلف تهیه گردیده است.

دقیق‌تر با سه مورد ( $\sigma_z, \sigma_x$  و  $z_c$ ) توصیف کند. نتایج حاصل از تحلیل گشتاور به عنوان یک پایگاه بزرگ داده می‌تواند برای تخمین آب آبیاری در یک چارچوب از روش‌های یادگیری ماشینی مانند شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون و بدون نیاز به شبیه‌سازی با Hydrus مورد استفاده قرار گیرد. لذا تحلیل گشتاورها ابزار کارآمدی را ارائه می‌دهد که می‌تواند برای تکمیل شاخص‌های مدیریت آبیاری نیز مورد استفاده قرار گیرد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های انجام شده

به منظور تخمین پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، تعیین نوع بافت خاک ضرورت دارد، اطلاعات خاک مورد مطالعه با ۷۰٪ شن، ۱۸٪ سیلت و ۱۲٪ رس نوع بافت خاک لوم شنی، با آزمایش هیدرومتری (جی و بائودر ۱۹۸۶) در آزمایشگاه گروه آبیاری دانشگاه تبریز توسط صمدیان فرد (۲۰۰۹) ثبت گردیده است. برای شبیه‌سازی جبهه رطوبتی در نرم‌افزار Hydrus ویژگی‌های فیزیکی از جمله چگالی ظاهری، چگالی واقعی ذرات، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و درصد شن، سیلت و رس مورد نیاز است. بدین منظور آزمایش داری برای تعیین هدایت هیدرولیکی



شکل ۱- منحنی مشخصه رطوبتی خاک آزمایشی (صمدیان فرد ۲۰۰۹).

جدول ۱- زمان‌های حفر ترانشه از شروع آبیاری بر حسب دقیقه برای دبی‌های ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت.

زمان‌های حفر (min)							دبی ( $L h^{-1}$ )
۳۶۰	۳۰۰	۲۴۰	۱۸۰	۱۲۰	۶۰	۳۰	۲
-	۱۸۰	۱۵۰	۱۲۰	۹۰	۶۰	۳۰	۴
-	۱۲۰	۱۰۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۶

### شبیه‌سازی عددی پیشروی جبهه رطوبتی

#### معادله ریچارد

راه حل معادله اصلاح شده ریچاردز برای یک جریان یکنواخت هم‌دما با آب به صورت سه بعدی در یک محیط متخلخل غیر اشباع که فاز هوا نقش مهمی در فرآیند جریان هوا ندارد به صورت زیر ارائه می‌شود:

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

که در آن  $\theta$  رطوبت حجمی [ $L^3 L^{-3}$ ]،  $h$  بار فشار [L]،  $S$  زهکشی [ $T^{-1}$ ] و  $K$  هدایت هیدرولیکی غیر اشباع [ $L T^{-1}$ ] که به صورت معادله ۲ ارائه می‌شود:

$$K(h, x, y, z) = k_s(x, y, z) k_r(h, x, y, z) \quad [2]$$

که در معادله [۱]،  $i$  و  $j$  برای نشان دادن محورهای مختصات در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  و تانسور  $k_{ij}^A$  نیز برای بیان ناهمسانی نفوذ پذیری خاک در جهت‌های مختلف به کار می‌رود که در آن درایه‌های قطری برابر یک و درایه‌های غیر قطری برابر صفر هستند. در این مطالعه مدلی که برای شبیه‌سازی عددی خواص هیدرولیکی



رطوبت باقی مانده  $[L^3L^{-3}]$ ،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع  $[LT^{-1}]$  و  $\alpha, n, l$  [بدون واحد] پارامترهای تجربی هستند. مدل Hydrus یکی از مدل‌های توانمند در شبیه‌سازی حرکت آب، نمک و گرما در خاک است که بر پایه حل عددی معادله ریچاردز است. به‌منظور شبیه‌سازی عددی پیشروی جبهه رطوبتی، نرم افزار Hydrus به کار برده شد. محدوده شبیه‌سازی، در صفحه دو بعدی به اندازه ۱۰۰ سانتی‌متر در ۱۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این شبیه‌سازی‌ها ۳۹۵۶ گره برای نشان دادن تمام محدوده شبیه‌سازی استفاده شده است. شکل ۲ بخشی از الگوی شبکه استفاده شده در نرم افزار Hydrus را نشان می‌دهد.

### تحلیل گشتاور

برای محاسبه گشتاور مکانی دو بعدی الگوی خیس شده از معادله زیر استفاده می‌شود که توسط (یه و همکاران ۲۰۰۵) تعریف شده است.

$$M_{ik}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \theta_{diff}(x, z, t) x^i z^k dx dz \quad [6]$$

$$\theta_{diff} = \theta(x, z, t) - \theta_0(x, z, t) \quad [7]$$

که در آن  $\theta(x, z, t)$  مقدار آب در یک زمان معین  $t$  و در یک مکان  $x, z$  است و  $\theta_0(x, z, t)$  مقدار اولیه آب است. گشتاورهای مکانی صفر، اول و دوم به ترتیب با ۰، ۱ یا ۲  $i+k=0$  مطابقت دارد. گشتاور صفر  $M_{00}$  کل حجم آب است که به مکان مورد نظر اعمال می‌شود.

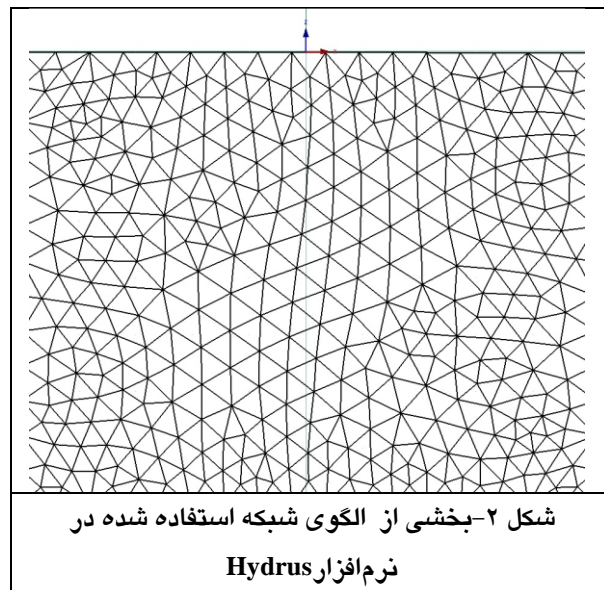
خاک انتخاب شده است مدل ون‌گنوختن<sup>۱</sup> معلوم است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad [3]$$

$$M = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1, \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [4]$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad [5]$$

که در آن  $S_e$  مقدار رطوبت اشباع مؤثر که بدون واحد است،  $\theta_s$  مقدار رطوبت در حال اشباع  $[L^3L^{-3}]$ ،  $\theta_r$  مقدار



لازم به ذکر است که شرایط اولیه به صورت مقدار آب و شرط مرزی به صورت جریان پیوسته در مرز پایینی محدوده در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی

<sup>2</sup> Zero Moment

<sup>1</sup> Van Genuchten

$$\frac{(x-p)^2}{k^2\sigma_x^2} + \frac{(z-z_c)^2}{k^2\sigma_z^2} \leq$$

$$1 \quad [10]$$

$$p = 0, \quad \frac{\sum M}{\sum M_{00}} \cong 1$$

x و z مختصات مکان (محیط بیضی) مورد نظر

[cm] است.  $z_c$  فاصله مرکز جرم در محور z [cm]

می‌باشد.  $k^2$  ضریب و M کل حجم آب موجود در داخل

بیضی رسم شده است.  $M_{00}$  کل حجم آب وارد شده به

منطقه مورد نظر است. هر چقدر نسبت  $M/M_{00}$  به یک

نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده مقدار مناسب k است. بعد از

محاسبه گشتاورها در مکان و زمان مختلف، جهت

مقایسه این نتایج با مدل شبیه‌سازی شده هایدروس،

بیضی در اطراف مرکز جرم ( $z_c, 0$ ) در یک صفحه دو

بعدی با استفاده از رابطه زیر تعریف گردید.

$$\frac{(x-p)^2}{k^2\sigma_x^2} + \frac{(z-z_c)^2}{k^2\sigma_z^2} = 1, \quad p =$$

$$0 \quad [11]$$

جهت رسم بیضی برای سه نوع دبی در نرم افزار اکسل

رابطه زیر تعریف گردید.

$$x = \pm \sqrt{1 - \frac{(z-z_c)^2}{k^2\sigma_z^2}} (k^2\sigma_x^2) + p^2, \quad p = 0$$

$$[12]$$

x و z مختصات مکان مورد نظر [cm] است.  $z_c$  فاصله

مرکز جرم در محور z [cm] می‌باشد.  $k^2$  ضریب و ( $L^2$ )

$\sigma_x^2$  و  $\sigma_z^2$  به ترتیب واریانس مکانی دو بعدی در جهت

محور x و z است.

## نتایج و بحث

گشتاور اول  $M_{01}$  و  $M_{10}$  مرکز مکان مورد نظر است که

فاصله را نشان می‌دهد و گشتاور درجه دو  $M_{20}$  و  $M_{02}$

مربوط به میزان پخش شدگی و گسترش آب در موقعیت

متوسط آن است. رابطه مورد استفاده برای محاسبه

مرکز جرم در خاک به حالت دو بعدی به صورت زیر

است:

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad z_c =$$

$$\frac{M_{01}}{M_{00}} \quad [8]$$

$x_c$  فاصله مرکز جرم در محور x،  $z_c$  فاصله مرکز جرم

در محور z است.

برای محاسبه واریانس مکانی در حالت دو بعدی در

جهت‌های x, z به صورت زیر می‌باشد (ردکلیف و

سیمونک ۲۰۱۰):

$$\sigma_x^2 = \frac{M_{20}}{M_{00}} - x_c^2, \quad \sigma_z^2 = \frac{M_{02}}{M_{00}} -$$

$$z_c^2 \quad [9]$$

در این تحقیق هدف از برنامه نویسی تقسیم

محدوده مورد نظر به قسمت‌های مساوی و پیدا کردن

مختصات مرکز هر قسمت و مقدار رطوبت نزدیک‌ترین

گره به مرکز هر قسمت است تا به این طریق گشتاورها

محاسبه گردد. با استفاده از برنامه نویسی محدود به

مربع‌های ۴ سانتی‌متر در ۴ سانتی‌متری تقسیم گردید،

در هر محور ۲۶ مربع ایجاد شد و در نهایت برنامه مورد

نظر اجرا شد. سپس مقدار عدد گشتاور (k) مناسب جهت

تعیین اندازه بیضی منطبق شده با شکل توزیع رطوبتی

شبیه سازی شده توسط مدل هایدروس از رابطه‌های زیر

مبنای سعی و خطا تعیین گردید.

## مشخصات فیزیکی خاک آزمایشی

درصد ذرات شن، سیلت و رس در جدول ۲ ارائه گردیده است.

نتایج آزمایش‌های خاک برای تعیین چگالی ظاهری، چگالی حقیقی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد آزمایش.

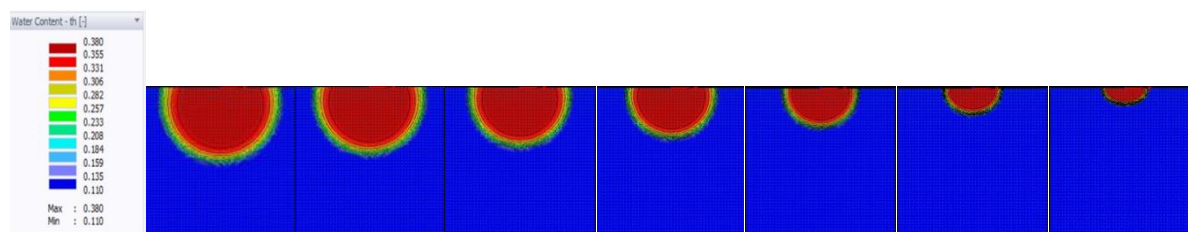
ویژگی‌های فیزیکی	چگالی ظاهری ( $g\ cm^{-3}$ )	چگالی واقعی ( $g\ cm^{-3}$ )	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع ( $cm\ day^{-1}$ )
مقدار حاصل از آزمایش	۱/۶۲	۲/۶۱	۷۰	۱۸	۱۲	۳۳

همچنین به منظور شبیه‌سازی عددی پیشروی جبهه رطوبتی، ابتدا باید پارامترهای مدل ون‌گنوختن محاسبه شوند. بدین منظور برازش مدل ون‌گنوختن با منحنی مشخصه رطوبتی حاصل از آزمایش دستگاه صفحات فشار با نوشتن برنامه‌ای در زبان برنامه نویسی Mathematica انجام گردیده و پارامترهای مدل ون‌گنوختن در جدول ۳ ارائه گردید.

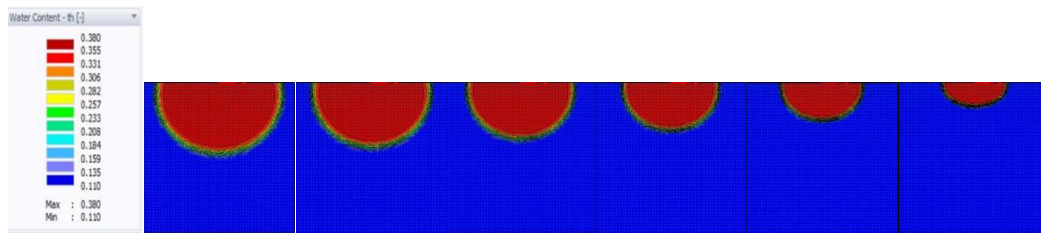
جدول ۳- پارامترهای مدل ون‌گنوختن

پارامتر	$\theta_r$	$\theta_s$	$cm^{-1}$	n
مقدار	۰/۰۸	۰/۳۸	۰/۰۲۴	۱/۸۹۶۱

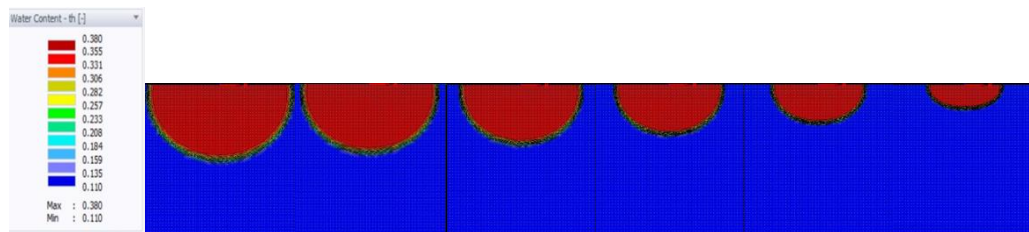
برای شبیه‌سازی مدل Hydrus، پروفیل خاک به عمق ۱ متر و عرض ۱ متر در نظر گرفته شده است. پس از تعیین فضای هندسی، محدوده مورد نظر شبکه‌بندی گردید و بعد از تعریف شدن شرایط اولیه و مرزی، برنامه اجرا گردید و جهت عملکرد مدل هایدروس و دقت بالای آن با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش‌های صمدیان فرد و همکاران (۲۰۰۹) تائید گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جبهه رطوبتی در Hydrus دو بعدی برای سه دبی ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت با زمان‌بندی مختلف برای حجم آب کاربردی ۱۲ لیتر در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.



الف) توزیع رطوبت خاک شبیه‌سازی شده برای دبی ۲ لیتر بر ساعت با هفت گام زمانی



ب) توزیع رطوبت خاک شبیه سازی شده برای دبی ۴ لیتر بر ساعت با شش گام زمانی



ج) توزیع رطوبت خاک شبیه سازی شده برای دبی ۶ لیتر بر ساعت با شش گام زمانی

شکل ۳- توزیع رطوبت خاک شبیه سازی شده در Hydrus-2D برای دبی های مورد مطالعه.

نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل ۳ نشان می دهد که مقدار رطوبت حجمی اولیه ۰/۱۱ و مقدار رطوبت حجمی در حالت اشباع ۰/۳۸۰ می باشد و میزان پخش شدگی آب با گذشت زمان در محورهای  $x$  و  $z$  افزایش می یابد. با افزایش دبی بیشترین پخش شدگی در محور  $x$  است که در دبی ۶ لیتر بر ساعت اتفاق می افتد.

نتایج حاصل از تحلیل گشتاورها در این تحقیق اولین گام برای محاسبات گشتاورها محاسبه  $M_{00}$ ،  $M_{01}$  و  $M_{10}$  جهت پیدا کردن مقادیر  $x_c$  و  $z_c$  برای سه دبی ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت در زمان های مختلف برای تامین حجم آب ورودی ۱۲ لیتری به خاک در یک جریان پیوسته است. جریان آب در خاک تحت جریان آب با مشخصات فوق توسط مدل

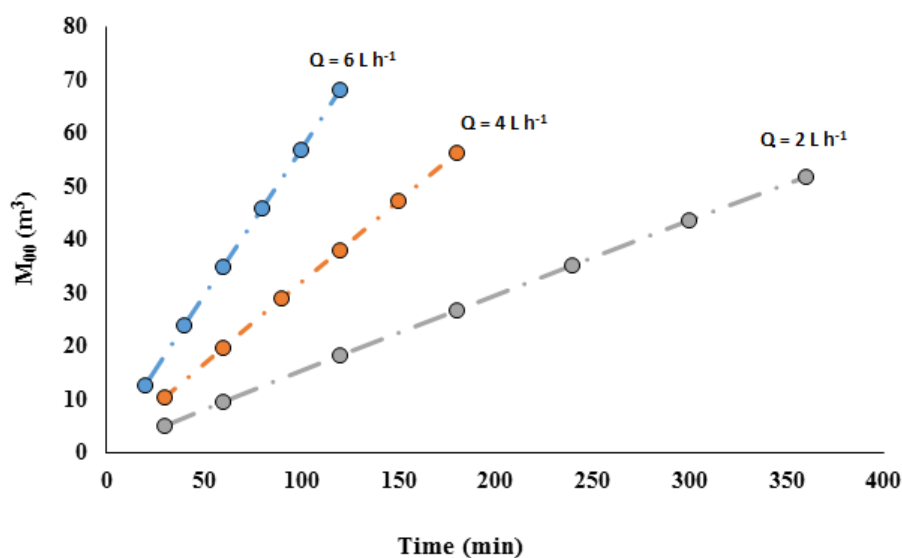
### نتایج حاصل از تحلیل گشتاورها

شکل ۴ رابطه بین مقادیر  $M_{00}$  های حاصله به ازای دبی های مختلف را نشان می دهد که بیانگر تمام مقادیر آب توزیع شده می باشد و به ازای یک دبی معین که دبی های ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت می باشد، می توان روابط تجربی مطلوبی بین آب توزیع شده و زمان  $M_{00} = f(t)$  به دست آورد.

در این تحقیق اولین گام برای محاسبات گشتاورها محاسبه  $M_{00}$ ،  $M_{01}$  و  $M_{10}$  جهت پیدا کردن مقادیر  $x_c$  و  $z_c$  برای سه دبی ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت در زمان های مختلف برای تامین حجم آب ورودی ۱۲ لیتری به خاک در یک جریان پیوسته است. جریان آب در خاک تحت جریان آب با مشخصات فوق توسط مدل

جدول ۴- نتایج حاصل از محاسبات  $M_{00}$ ،  $z_c$ ،  $\sigma_x^2$  و  $\sigma_z^2$  برای سه دبی ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت.

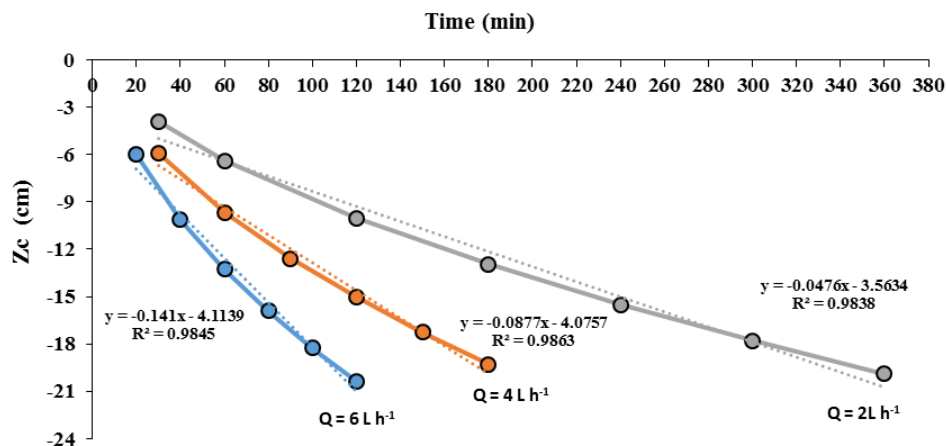
$\sigma_z^2 (cm^2)$	$\sigma_x^2 (cm^2)$	$z_c (cm)$	$M_{00}(m^3)$	زمان (min)	دبی
۹/۳۲۰	۶۱/۱۶۲	-۳/۸۷۸	۵/۱۹۳	۳۰	$Q = 2 L h^{-1}$
۲۳/۰۶۸	۹۵/۴۶۷	-۶/۳۷۷	۹/۵۸۵	۶۰	
۵۱/۶۱۵	۱۶۱/۵۷۳	-۱۰/۰۲۹	۱۸/۱۵۸	۱۲۰	
۸۱/۳۶۹	۲۲۵/۱۲۹	-۱۲/۹۴۸	۲۶/۶۶۵	۱۸۰	
۱۱۲/۶۲۹	۲۸۵/۲۹۶	-۱۵/۵۰۶	۳۵/۱۱۷	۲۴۰	
۱۴۴/۰۶۵	۳۴۳/۳۶۸	-۱۷/۷۸۱	۴۳/۵۰۷	۳۰۰	
۱۷۶/۳۱۳	۴۰۰/۰۸۶	-۱۹/۸۹۰	۵۱/۴۹۵	۳۶۰	
۱۹/۶۷۸	۱۲۳/۷۶۱	-۵/۸۸۹	۱۰/۳۹۸	۳۰	$Q = 4 L h^{-1}$
۴۸/۱۸۷	۱۹۴/۶۸۵	-۹/۶۸۴	۱۹/۷۵۵	۶۰	
۷۶/۵۳۰	۲۶۵/۷۷۳	-۱۲/۵۸۱	۲۸/۹۸۸	۹۰	
۱۰۵/۶۵۰	۳۵۵/۵۷۳	-۱۵/۰۲۵	۳۸/۰۹۴	۱۲۰	
۱۳۵/۹۱۳	۴۰۱/۷۱۹	-۱۷/۲۵۰	۴۷/۱۵۲	۱۵۰	
۱۶۶/۶۶۷	۴۶۸/۰۲۶	-۱۹/۲۷۹	۵۶/۲۳۸	۱۸۰	
۲۰/۲۰۵	۱۷۱/۵۷۷	-۶/۰۰۶	۱۲/۵۲۹	۲۰	$Q = L h^{-1}$
۵۱/۹۳۶	۲۵۶/۹۴۲	-۱۰/۱۴۱	۲۳/۸۰۸	۴۰	
۸۴/۲۶۶	۳۴۶/۷۴۶	-۱۳/۲۵۶	۳۴/۹۴۱	۶۰	
۱۱۷/۶۱۶	۴۳۳/۸۵۱	-۱۵/۸۹۶	۴۵/۸۸۳	۸۰	
۱۵۱/۲۵۰	۵۲۰/۱۷۴	-۱۸/۲۳۶	۵۶/۸۷۲	۱۰۰	
۱۸۵/۶۸۲	۶۰۹/۸۱۳	-۲۰/۳۵۹	۶۸/۰۶۱	۱۲۰	



شکل ۴- نمودار  $M_{00}$  برای سه دبی به ازای زمان‌های مختلف.

داده استفاده شده، کمی بیشتر از مقدار مورد نظر است. اینکه چرا مقدار  $M_{00}$  در دبی ۶ لیتر بر ساعت بیشتر از مقدار مورد انتظار است، در شبیه‌سازی دبی ۶ لیتر بر ساعت تغییر در اندازه قطر ورودی و مقدار قلاکس باعث تغییر در مقدار آب وارد شده به خاک می‌شود و حجم زیادی از خاک را مرطوب می‌کند که علت این مسئله است. در ادامه شکل ۵ رابطه بین  $Z_c$  و زمان را به ازای دبی‌های ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت نشان می‌دهد.

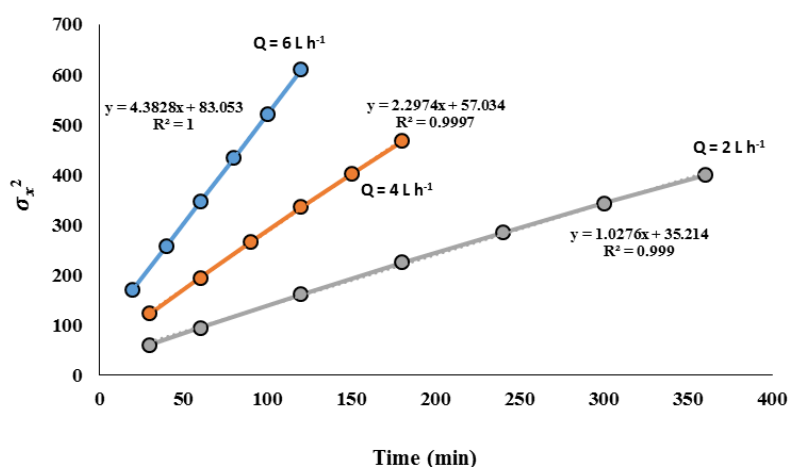
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود یک رابطه خطی بین زمان و مقادیر آب وارد شده به خاک با کاربرد روش گشتاورها حاصل شده است و تناسب بین دبی‌های ورودی و تغییرات مقادیر آب اضافه شده به خاک کاملاً مشهود است که می‌تواند به دقت و صحت عملکرد روش گشتاور ربط داده شود. همچنین مقدار کل آب وارد شده برای دبی ۲ و ۴ لیتر بر ساعت بر اساس داده‌های استفاده شده نتیجه‌ی خوبی به دست آمده است اما نتیجه حاصل برای دبی ۶ لیتر بر ساعت بر اساس



شکل ۵- نمودار مقایسه  $Z_c$  برای سه نوع دبی به ازای زمان‌های مختلف.

می‌شود. اختلاف در مقدار دبی منجر به متفاوت بودن منحنی‌ها در نمودار  $Z_c$  شده است.  $Z_c$  در دبی ۶ لیتر بر ساعت بعد از ۲ ساعت آبیاری، با  $Z_c = ۲۰/۳۵۹۴$  به عمیق‌ترین مقدار خود رسیده است. در شکل ۶ مقادیر  $\sigma_x^2$  در زمان‌های مختلف قابل مشاهده می‌باشد.

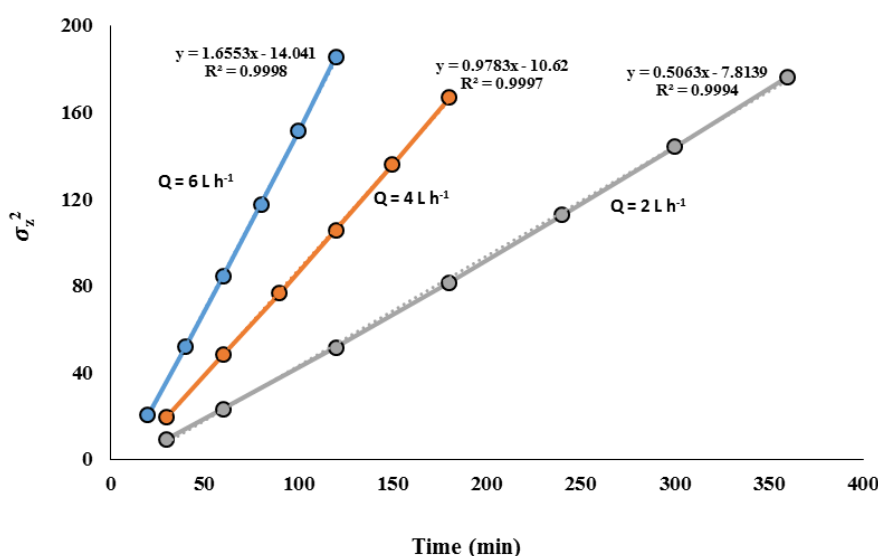
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با پیشرفت زمان، مسافت پیشروی آب از سطح به عمق بیشتر می‌شود و به خوبی با تغییر مقادیر  $Z_c$  نشان داده شده است. در اوایل رویداد آبیاری،  $Z_c$  به سرعت پیشرفت می‌کند، ولی پس از مدتی سرعت پیشروی تقریباً ثابت



شکل ۶- نمودار مقایسه  $\sigma_x^2$  ( $cm^2$ ) برای سه نوع دبی به ازای زمان‌های مختلف.

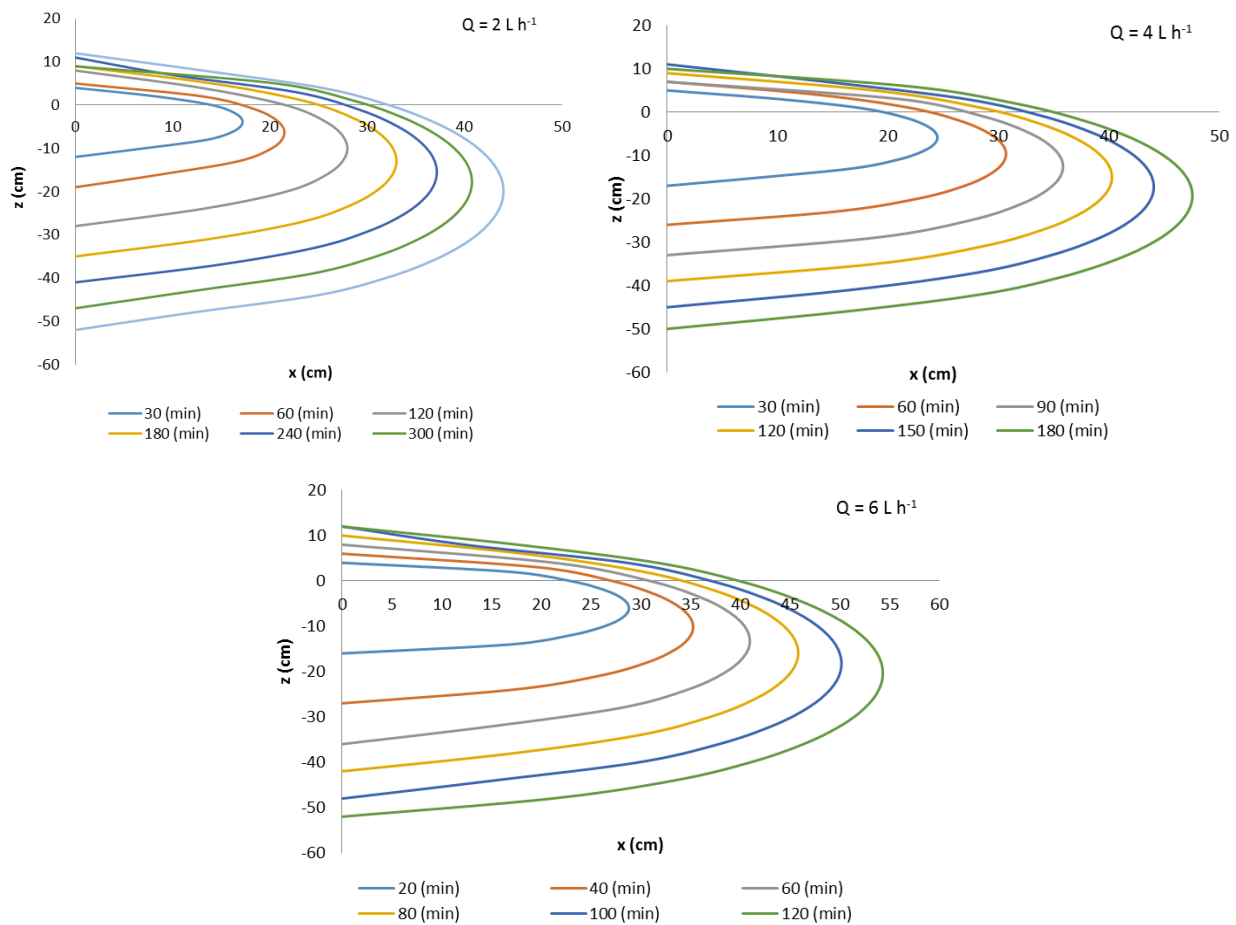
در نمودار شکل ۶ به‌طور مجزا نمودار هر یک از دبی‌ها نشان داده شده است. با گذشت زمان مقدار  $\sigma_x^2$  تغییر می‌کند و همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چقدر طول مدت زمان آبیاری کوتاه‌تر و مقدار دبی بیشتر باشد، تغییر واریانس بیشتری خواهد داشت که بیشترین مقدار  $\sigma_x^2 = 609/8136$  در دبی ۶ لیتر بر ساعت است که به مدت ۲ ساعت آبیاری انجام شده است، مقدار متوسط

در نمودار شکل ۶ به‌طور مجزا نمودار هر یک از دبی‌ها نشان داده شده است. با گذشت زمان مقدار  $\sigma_x^2$  تغییر می‌کند و همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چقدر طول مدت زمان آبیاری کوتاه‌تر و مقدار دبی بیشتر باشد، تغییر واریانس بیشتری خواهد داشت که بیشترین مقدار  $\sigma_x^2 = 609/8136$  در دبی ۶ لیتر بر ساعت است که به مدت ۲ ساعت آبیاری انجام شده است، مقدار متوسط



شکل ۷- نمودار مقایسه  $\sigma_z^2$  برای سه نوع دبی به ازای زمان‌های مختلف بر حسب سانتی‌متر مربع.

همان طور که مشاهده می شود. همان طور که مشاهده شده است در  $k=2/2$  برای سه دبی در زمان بندی مختلف مقدار ثابتی است. بعد از محاسبات گشتاورها برای هر دبی در زمان های مختلف از شروع آزمایش بیضی در اطراف فاصله مرکز جرم ( $z_c$ ) با استفاده از نرم افزار اکسل رسم گردیده که در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- بیضی رسم شده برای دبی های ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت به ازای گام های زمانی مورد نظر.

همان طور که مشاهده می شود به دلیل متفاوت بودن مقدار رطوبت اعمال شده به منطقه مورد نظر در زمان بندی مختلف، مقدار  $z_c$ ،  $\sigma_z^2$ ،  $\sigma_x^2$  متفاوت بوده و باعث ایجاد تغییر در اندازه بیضی ها در دبی های مختلف شده است. افزایش اندازه بیضی ها نشان دهنده پخش شدگی زیاد آب در آن منطقه است. برای مقایسه

بهرتر بیضی رسم شده توسط نتایج حاصل از محاسبات گشتاورها با مدل هایدروس شبیه سازی شده توسط نرم افزار هایدروس جدول ۵ ارائه شده است. بررسی های انجام شده در این مطالعه نشان داد که بین تمام مقادیر آب توزیع شده یعنی  $M_{00}$  حاصله به ازای دبی های مختلف در زمان های متفاوت و جذر واریانس توزیع آب

همان طور که مشاهده می شود به دلیل متفاوت بودن مقدار رطوبت اعمال شده به منطقه مورد نظر در زمان بندی مختلف، مقدار  $z_c$ ،  $\sigma_z^2$ ،  $\sigma_x^2$  متفاوت بوده و باعث ایجاد تغییر در اندازه بیضی ها در دبی های مختلف شده است. افزایش اندازه بیضی ها نشان دهنده پخش شدگی زیاد آب در آن منطقه است. برای مقایسه



لگاریتمی ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۸۲ و میانگین درصد خطای مطلق ۴/۸۸ حاصل شد.

نسبت به مبدا مختصات ( $\sigma_0$ ) در حالت رگرسیون خطی ضریب همبستگی<sup>۱</sup> ۰/۹۸۶ و میانگین درصد خطای مطلق<sup>۲</sup> برابر با ۴/۶۴ را ارائه شد و همچنین در حالت رگرسیون

جدول ۵- مقایسه قطر و عمق جبهه رطوبتی مدل Hydrus با بیضی رسم شده برای دبی های ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت.

مدل	دبی	زمان (min)	مقدار (cm)	دبی	زمان (min)	مقدار (cm)	دبی	زمان (min)	مقدار (cm)
هایدروس	قطر	۳۰	۱۶/۸۲	۲۰	۳۰	۲۲/۸۲	۶۰	۳۰	۲۶/۳۶
	عمق	۳۰	-۱۲/۷۰		۳۰	-۱۷/۸۰		۳۰	-۱۷/۸۲
بیضی	قطر	۳۰	۱۷/۲۰	۲۰	۳۰	۲۴/۳۷	۶۰	۳۰	۲۸/۸۱
	عمق	۳۰	-۱۲		۳۰	-۱۷		۳۰	-۱۶
هایدروس	قطر	۶۰	۲۰/۷۹	۴۰	۶۰	۲۹	۱۲۰	۶۰	۳۲/۷۴
	عمق	۶۰	-۱۹/۰۸		۶۰	-۲۶/۶۰		۶۰	-۲۷/۶۹
بیضی	قطر	۶۰	۲۱/۴۵	۴۰	۶۰	۳۰/۵۸	۱۲۰	۶۰	۳۵/۱۷
	عمق	۶۰	-۱۹		۶۰	-۲۶		۶۰	-۲۷
هایدروس	قطر	۱۲۰	۲۷/۲۰	۶۰	۹۰	۳۳/۸۱	۳۶۰	۱۲۰	۳۷/۸۵
	عمق	۱۲۰	-۲۸/۰۴		۹۰	-۳۴/۰۸		۹۰	-۳۵/۶۳
بیضی	قطر	۱۲۰	۲۷/۷۴	۶۰	۹۰	۳۵/۸۵	۳۶۰	۱۲۰	۴۰/۸۸
	عمق	۱۲۰	-۲۸		۹۰	-۳۳		۹۰	-۳۶
هایدروس	قطر	۱۸۰	۳۱/۶۸	۸۰	۱۲۰	۳۷/۶۲	۱۰۸۰	۱۸۰	۴۲
	عمق	۱۸۰	-۳۵/۳۰		۱۲۰	-۴۰/۲۱		۱۲۰	-۴۲/۴۴
بیضی	قطر	۱۸۰	۳۲/۸۵	۸۰	۱۲۰	۴۰/۳۰	۱۰۸۰	۱۸۰	۴۵/۶۷
	عمق	۱۸۰	-۳۵		۱۲۰	-۳۹		۱۲۰	-۴۲
هایدروس	قطر	۲۴۰	۳۵/۵۲	۱۰۰	۱۵۰	۴۱/۴۲	۳۶۰۰	۲۴۰	۴۶/۵۵
	عمق	۲۴۰	-۴۱/۷۱		۱۵۰	-۴۵/۲۸		۱۵۰	-۴۷/۵۵
بیضی	قطر	۲۴۰	۳۷/۱۰	۱۰۰	۱۵۰	۴۴/۱۰	۳۶۰۰	۲۴۰	۵۰/۰۶
	عمق	۲۴۰	-۴۱		۱۵۰	-۴۵		۱۵۰	-۴۸
هایدروس	قطر	۳۰۰	۳۹/۱۵	۱۲۰	۱۸۰	۴۴/۳۸	۳۶۰۰	۳۰۰	۴۹/۹۵
	عمق	۳۰۰	-۴۷/۰۵		۱۸۰	-۴۹/۹۳		۱۸۰	-۵۲/۶۵
بیضی	قطر	۳۰۰	۴۰/۷۲	۱۲۰	۱۸۰	۴۷/۵۴	۳۶۰۰	۳۰۰	۵۴/۳
	عمق	۳۰۰	-۴۷		۱۸۰	-۵۰		۱۸۰	-۵۲
هایدروس	قطر	۳۶۰	۴۱/۹۳					۳۶۰	۴۱/۹۳

<sup>2</sup> Mean Absolute Percentage Error

<sup>1</sup> Correlation Coefficient

عمق	۰۱/۷۴-
قطر	۴۴
بیضی	۰۲-
عمق	

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، دقت روش تحلیل گشتاورها در شبیه‌سازی انواع الگوهای رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای تحت دبی‌های متفاوت با کاربرد حجم‌های متفاوت آب مورد بررسی قرار گرفت و امکان استفاده از این قابلیت برای پیش‌بینی الگوی رطوبت حاصل از یک دبی معین با کاربرد حجم آب مشخص نیز بررسی گردید. در این تحقیق ابتدا به منظور بررسی گشتاور مقادیر آب توزیع شده در خاک توسط آبیاری قطره‌ای، شبیه‌سازی توسط نرم افزار Hydrus-2D- برای سه دبی ۲، ۴ و ۶ لیتر بر ساعت با حجم آب ورودی ۱۲ لیتری انجام گردید. بررسی‌های انجام یافته در این تحقیق نشان داد که بین تمام مقادیر آب توزیع شده و جذر واریانس توزیع آب نسبت به مبدا مختصات  $\sigma_0$  را می‌توان در یک رابطه تجربی دقیق به دست آورد که این رابطه نشان می‌دهد  $\sigma_0$  بدون توجه به دبی کاربردی و زمان نظیر آن صرفاً بر مبنای میزان رطوبت اضافه شده به خاک  $M_{00}$  می‌تواند با دقت قابل قبولی برآورد شود. با محاسبات گشتاورها مشخص شد که گشتاورها قابلیت بیان موقعیت مرکز جرم آب توزیع شده در خاک و نحوه توزیع آن نسبت به محورهای  $x$  و  $z$  را دارا می‌باشند، چرا که ضریب همبستگی نزدیک یک و میانگین درصد خطای مطلق نزدیک پنج گواه بر این ادعاست. افزایش اندازه بیضی‌ها نشان دهنده پخش‌شدگی بیشتر آب در آن منطقه است. با مقایسه مقادیر قطر و عمق جبهه رطوبتی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵، با مقایسه مقادیر قطر و عمق حاصل از مدل Hydrus و بیضی رسم شده می‌توان نتیجه گرفت که هر دو روش نتایج نزدیک به هم ارائه کرده به این صورت که در دبی ۲ لیتر بر ساعت و در زمان ۱۲۰ دقیقه قطر حاصل از مدل Hydrus ۲۷/۲۰ سانتی‌متر و قطر حاصل از بیضی ۲۷/۷۴ سانتی‌متر برآورد گردید و این یعنی ۰/۵۴ سانتی‌متر معادل ۵/۴ میلی‌متر اختلاف و در مورد عمق حاصل از Hydrus که برابر با ۲۸/۰۴ و با استفاده از روش تحلیل گشتاور ۲۸/۰۰ ( به میزان ۰/۰۴ سانتی‌متر اختلاف) برآورد گردید که بیانگر عملکرد یکسان هر دو روش در برآورد ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای می‌باشد. همچنین می‌توان چنین استنباط کرد که عملکرد نزدیک به هم هر دو روش هایدروس و تحلیل گشتاور در دبی ۲ لیتر بر ثانیه نسبت به دو دبی دیگر بهتر صورت گرفته است. براساس نتایج حاصل از پژوهش محققان قبلی (شیونگ و همکاران (۲۰۱۱) و لازاوویچ و همکاران (۲۰۰۷))، می‌توان با کاربرد گشتاورها تحت آبیاری قطره‌ای نحوه الگوی توزیع رطوبت در خاک را با دقت مطلوبی شبیه‌سازی نمود. دقت روش تحلیل گشتاورها در شبیه‌سازی انواع الگوهای رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای تحت دبی‌های متفاوت با کاربرد حجم‌های متفاوت آب مورد بررسی مشابه مدل Hydrus بوده و لذا امکان استفاده از این قابلیت برای پیش‌بینی الگوی رطوبت حاصل از یک دبی معین با کاربرد حجم آب مشخص امکان پذیر می‌باشد.

بین مدل Hydrus شبیه سازی شده و مدل تحلیل گشتاور مشخص شد که مدل تحلیل گشتاور روشی کارآمد برای مطالعه نحوه توزیع رطوبت آب توسط آبیاری قطره ای است. پیشنهاد می شود نحوه توزیع آب در بافت های مختلف خاک، در آبیاری قطره ای توسط تحلیل گشتاور دو بعدی در مطالعات بعدی مورد بررسی واقع شود.

#### منابع مورد استفاده

- Alizadeh A, 1998. Principles and Operation of Drip Irrigation. Astan Quds Razavi, Mashhad. (In Persian with English abstract)
- Farajzadeh K, 2014. Simulation of pulsed drip irrigation and determination of wet diameter and depth and the most appropriate cut-off ratio. MSc Thesis, University of Tabriz. (In Persian with English abstract)
- Gee GW and Bauder JW, 1986. Particle-size analysis. Pp.383-411. In: Klute A, (Ed.) Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd Ed., Agron. Monogr. 9. ASA-SSSA, Madison, WI.
- Kandelous M and Simunek J, 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management* 97:1070-1076.
- Karimi B, Sohrabi T, Mirzaei F and Ababaei B, 2015. Developing equations to predict the pattern of soils moisture redistribution in surface and subsurface drip irrigation systems using dimension analysis. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(6): 223-237.
- Karimi B, Mohammadi P, Sanikhani H, Salih SQ and Yaseen ZM, 2020. Modeling wetted areas of moisture bulb for drip irrigation systems: An enhanced empirical model and artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105767.
- Karimi B, Karimi N, Shiri J and Sanikhani H, 2022. Modeling moisture redistribution of drip irrigation systems by soil and system parameters: regression-based approaches. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 36(1):157-172.
- Kazemi H, Sadraddini AA, Nazemi AH and Sanchez C, 2021. A moment analysis for modeling soil water distribution in furrow irrigation: variable vs. constant ponding depths. *Water* 13, 1415. <https://doi.org/10.3390/w13101415>
- Kisi O, Khosravinia P, Heddam S, Karimi B and Karimi N, 2021. Modeling wetting front redistribution of drip irrigation systems using a new machine learning method: Adaptive neuro-fuzzy system improved by hybrid particle swarm optimization-Gravity search algorithm. *Agricultural Water Management* 256, 107067.
- 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.
- Lazarovitch N, Warrick, AW, Furman A and Zerihun D, 2009. Subsurface water distribution from furrows described by moment analyses. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135:7-12.
- Radcliffe D and Simunek J, 2010. *Soil Physics with HYDRUS: Modeling and Applications*, CRC Press, Taylor and Francis Group: Boca Raton, FL, USA.
- Samadianfard S, 2009. Numerical and analytical simulation of moisture front progress in drip irrigation. MSc Thesis, University of Tabriz. (In Persian with English abstract)
- Samadianfard S, Sadraddini AA and Nazemi AH, 2011. Numerical and analytical simulation of moisture front progress in drip irrigation. *Soil and Water Science* 22(3): 1-16. (In Persian with English abstract)
- Samadianfard S, Nazemi AH and Sadraddini AA, 2014. M5 model tree and gene expression programming based modeling of sandy soil water movement under surface drip irrigation. *Agriculture Science Development* 3:178-190. (In Persian with English abstract)
- Shiri J, Karimi B, Karimi N, Kazemi MH and Karimi S, 2020. Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *Journal of Hydrology*, 585, 124792.
- Solat S, Alinazari F, Maroufpoor E, Shiri J and Karimi B, 2021. Modeling moisture bulb distribution on sloping lands: Numerical and regression-based approaches. *Journal of Hydrology* 601, 126835.

- Sperling O and Lazarovitch N, 2010. Characterization of water infiltration and redistribution for two-dimensional soil profiles by moment analyses. *Vadose Zone Journal* 9: 438–444.
- Xiong Y, Furman A and Wallach R, 2011. Moment analysis description of wetting and redistribution plumes in wettable and water-repellent soils. *Journal of Hydrology* 423: 30- 42.
- Yeh TCJ, Ye M and Khaleel R, 2005. Estimation of effective unsaturated hydraulic conductivity tensor using spatial moments of observed moisture plume. *Water Resource Research* 41, doi:10.1029/2004WR003736.
- Zdankhah P and Khaledian MR, 2013. Improving model efficiency of HYDRUS-2D by considering temporal variability in soil hydraulic properties. *Soil and Water Science* 26(6): 1440-1449. (In Persian with English abstract)
- Zhenjie Q, Jiusheng L and Weixia Z, 2017. Effects of lateral depth and irrigation level on nitrate and *Escherichia coli* leaching in the North China Plain for subsurface drip irrigation applying sewage effluent. *Irrigation Science* 35(6): 469-482