

## Simulation of moisture distribution in different soil textures under a point source using the moment analysis method

Ali Nouri<sup>1</sup>, Ali Ashraf Sadraddini<sup>2</sup>, Saeed Samadianfard<sup>3\*</sup>, Fatemeh Mikaeili<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Department of Water Science of Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Water Science of Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Water Science of Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>4</sup> Ph.D. Student, Department of Water Science of Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

Water scarcity and the need for optimal water utilization in arid and semi-arid regions, including Iran, have encouraged water authorities and farmers to adapt modern irrigation systems like drip irrigation, to make optimal use of water resources. The most important advantage of drip irrigation over other irrigation methods is its ability to control the amount of water applied to each plant. New irrigation methods focus on plant irrigation and not on land irrigation. In arid and semi-arid regions, a drip irrigation system is used to use water optimally and prevent wastage and evaporation. Factors such as soil texture, type of cultivated plant, amount of available water, distance of drippers and laterals, the wetted surface, and the dimensions of the moisture bulb under the soil surface are involved in the design of the drip irrigation system. Due to the variety of soil textures in the earth, the movement of water under the soil surface is different in all kinds of textures, therefore, knowing exactly how water moves in the soil and how the moisture bulb is distributed under the soil surface is of particular importance. The purpose of this study is to investigate the movement of moisture bulbs, check their dimensions under the soil surface in different soil textures and flow rates, and evaluate the capability of the Moment analysis method to simulate this process under various conditions.

#### Materials and Methods

To simulate the moisture bulb in different soil textures, detailed information on the physical properties of the soil, including the percentage of particles that make up the soil texture, bulk and real density, porosity, and saturated hydraulic conductivity, is required. In this research, the simulation of the moisture front in different soil texture was conducted using Rosetta software, which defines 12 types of soil textures. In these tests, the source of soil power was considered as surface and point. The total feeding volume of each type of soil texture is 24 L, and this volume was used with different flow rates of two, four, six, and eight L s<sup>-1</sup>. To numerically simulate the progress of the moisture front, Hydrus software was used. Then the analytical simulation of the moisture front was done using the equations of the Moment analysis method. In this study, an ellipse was drawn to represent the moisture bulb simulated by Hydrus software at different times for the applied flow rates. Coefficient k was used to draw the ellipse, and its appropriate value was determined by minimizing the difference between the model and Hydrus results.

#### Results and Discussion

To calculate the moments, the first step is to obtain the values of M<sub>00</sub>. According to the applied flow rates of two, four, six, and eight L s<sup>-1</sup> and the amount of volume intended to feed all types of soil texture, i.e., 24 L, the duration of irrigation is 12, 6, 4, and 3 hr, respectively. The comparison of moisture distribution over all periods and soil textures showed acceptable results, and the distributed subsurface moisture values were similar. In the study of clay texture, with time from the start of irrigation, the difference in the total amount of distributed moisture increased, and the reason for this result is the decrease in the permeability of the clay due to the filling of fine pores. The results indicated that  $\sigma_{x2}$  values changed with the increase in irrigation duration. The highest variance was found in sandy clay with a flow rate of 8 L s<sup>-1</sup> (1503.3 cm<sup>2</sup>), while the lowest variance was

observed in clay texture with a flow rate of  $4 \text{ L s}^{-1}$  ( $368.6 \text{ cm}^2$ ). By increasing the amount of applied discharge,  $\sigma_{z2}$  increases and the slope of this increase is different in each soil texture, according to the characteristics of that texture. Also, the effect of irrigation duration on the value of  $\sigma_{z2}$  is evident. In other words, the longer the duration of irrigation, the more the amount of variance changes.

### Conclusion

In this research, the accuracy of the Moment analysis method in predicting moisture distribution from drip irrigation was evaluated using results from Hydrus and Moment analysis. The Hydrus results demonstrated that the moisture bulb expanded over time in both the horizontal and vertical directions. The results also indicated higher flow rates increased the horizontal expansion of the moisture bulb, while the duration of irrigation affected both horizontal and depth expansions. Using the moment analysis method, the center of mass of water distribution in the soil and the changes in the moisture front along the x and z axes were determined. By examining and comparing the dimensions of the moisture front resulting from Hydrus and ovals, it was observed that there is a suitable compatibility between the two methods. Therefore, the Moment analysis method can be relied upon to estimate the dimensions of the moisture bulb in drip irrigation. It also provides an efficient and accurate approach to reducing the time and cost of field experiments.

**Keywords:** Center of mass, Hydrus, Moisture front, Moment analysis method, Simulation.

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to the University of Tabriz for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

### Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

### Authors' contribution

**Ali Nouri:** Software, methodology, formal analysis and investigation, original draft preparation; **Ali Ashraf Sadraddini:** Resources, manuscript editing, supervision, conceptualization; **Saeed Samadianfard:** Resources, software, manuscript editing, supervision, methodology; **Fatemeh Mikaeili:** Software, visualization, original draft preparation.

\*Corresponding Author, E-mail: s.samadian@tabrizu.ac.ir

**Citation:** Nouri, A., Sadraddini, A.A., Samadianfard, S., & Mikaeili, F. (2024). Simulation of moisture distribution in different soil textures under a point source using the moment analysis method. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(4), 167-182.

DOI: 10.22098/mmws.2023.13615.1354

Received: 02 September 2023, Received in revised form: 06 November 2023, Accepted: 06 November 2023, Published online: 06 November 2023

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 167-182

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## شبیه سازی توزیع رطوبت در انواع بافت خاک تحت منبع نقطه ای با استفاده از روش تحلیل گشتاور

علی نوری<sup>۱</sup>، علی اشرف صدرالدینی<sup>۲</sup>، سعید صمدیان فرد<sup>۳\*</sup>، فاطمه میکائیلی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۲</sup> استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

به منظور طراحی یک سامانه آبیاری قطره ای، عوامل و متغیرهایی هم چون نوع خاک و توپوگرافی منطقه، اقلیم و شرایط آب و هوایی و نوع کشت گیاه مؤثر هستند تا بهترین فاصله قطره چکان ها، لوله های اصلی و لوله های فرعی در اجرای سامانه آبیاری قطره ای انتخاب شوند. یکی از مهم ترین عوامل در طراحی سامانه های آبیاری، داشتن آگاهی از الگوی حرکت جبهه رطوبتی در زیرسطح خاک است. این عامل تعیین کننده فاصله قطره چکان ها و مشخص کننده عمق نصب لترال ها و معین کننده فشار کارکرد سامانه است. روش تحلیلی گشتاور یکی از مدل های پرکاربرد و دقیقی است که می توان به کمک آن و با داشتن خصوصیات فیزیکی بافت خاک، با محاسبه گشتاور درجه اول و دوم، مقادیر رطوبت و تغییرات آن را بررسی کرد. در این پژوهش، به منظور بررسی حرکت جبهه رطوبت زیرسطحی در انواع مختلف بافت خاک، تحت دبی های کاربردی متفاوت، به کمک روش گشتاور، ابتدا شبیه سازی حرکت پیاز رطوبتی به کمک نرم افزار هایدروس دو بعدی انجام شد. در این نرم افزار شبیه سازی ۱۲ نوع بافت خاک تعریف شده در زیر برنامه رزتا، تحت دبی های دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعت با هدف تغذیه اراضی به میزان ۲۴ لیتر انجام شد. پس از شبیه سازی مقادیر رطوبت در گره های مختلف، با توجه به مختصات، آن گره ها به فایل اکسل منتقل شد. در این فایل محدوده لحاظ شده برای شبیه سازی مجدداً شبکه بندی و برای مراکز هر شبکه میزان رطوبت نزدیک ترین گره اختصاص داده شد. نتایج حاصل از این بررسی ها نشان داد که گشتاورها قابلیت بیان موقعیت مرکز جرم آب توزیع شده در خاک را در بهترین حالت با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۷ و جذر میانگین مربعات خطای ۰/۶۰ در دبی چهار لیتر بر ساعت دارا هستند. در حالت کلی، با افزایش میزان دبی مقدار خطا بیش تر و همبستگی کاهش می یابد. هم چنین، با استفاده از این روش می توان موقعیت مرکز جرم آب توزیع شده در خاک و تغییرات جبهه رطوبتی را نسبت به محور x و z را به دست آورد. با کاربرد ضریب K بهینه رابطه بیضی نشان دهنده محدوده پیاز رطوبتی رسم شد که دقت مطلوبی را در مقایسه با نتایج حاصل از نرم افزار هایدروس نشان داد و قابلیت مناسب مدل پیشنهادی را تأیید نمود.

**واژه های کلیدی:** جبهه رطوبتی، روش تحلیل گشتاور، شبیه سازی، مرکز جرم، هایدروس

**نوع مقاله:** پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s.samadian@tabrizu.ac.ir

**استناد:** نوری، علی، صدرالدینی، علی اشرف، صمدیان فرد، سعید، و میکائیلی، فاطمه (۱۴۰۳). شبیه سازی توزیع رطوبت در انواع بافت خاک تحت منبع نقطه ای با استفاده از روش تحلیل گشتاور. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*. ۴(۴)، ۱۶۷-۱۸۲.  
DOI: 10.22098/mmws.2023.13615.1354

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵

*مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، سال ۱۴۰۳، دوره ۴ شماره ۴، صفحه ۱۶۷ تا ۱۸۲

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

به‌منظور مصرف بهینه آب و جلوگیری از هدررفت و تبخیر زیاد آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، استفاده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای توصیه می‌شود. اگر کارایی آبیاری تنها ۱۰ درصد افزایش یابد، بدون سرمایه‌گذاری در توسعه منابع آبی جدید، می‌توان تمام آب مورد نیاز شرب و صنعت دنیا را تأمین نمود (Jahantigh, 2021). در طراحی سامانه آبیاری قطره‌ای عواملی هم‌چون بافت خاک، نوع گیاه کشت شده، میزان آب در دسترس، فاصله قطره‌چکان‌ها، لترال‌ها و سطح خیس شده و ابعاد پیاز رطوبتی در زیر سطح خاک، دخیل هستند. با توجه به گوناگونی بافت خاک در زمین، حرکت آب در زیر سطح خاک در انواع بافت‌ها متفاوت است، از این‌رو، شناخت دقیق چگونگی حرکت آب در خاک و نحوه توزیع پیاز رطوبتی در زیر سطح خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای بهینه‌سازی سامانه آبیاری، اطلاع از ابعاد جبهه رطوبتی در انواع بافت خاک‌ها کمک شایانی در طراحی سامانه، انتخاب بهینه فاصله لترال‌ها و گسیلنده‌ها می‌کند (Zhenjie et al., 2017). انجام آزمایش‌های میدانی جهت بررسی ابعاد جبهه رطوبتی نیازمند زمان زیادی بوده و در بعضی موارد، عملاً غیرممکن است. از این‌رو، استفاده از مدل شبیه‌سازی عددی هم‌چون مدل هایدروس، که قادر به شبیه‌سازی حرکت املاح، گرما و رطوبت در شرایط اشباع و غیراشباع خاک است، می‌تواند مفید واقع شود (Hinnell et al., 2010). در سال‌های اخیر پژوهش‌گران مطالعاتی در جهت پیرامون توصیف توزیع جبهه رطوبتی انجام داده‌اند.

در این راستا، Lazarovitch et al. (2007) به بررسی الگوی توزیع زیرسطحی و سطحی رطوبت در آبیاری قطره‌ای به کمک تحلیل گشتاورها<sup>۱</sup> پرداخت. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار هایدروس در سه نوع متفاوت خاک شنی و لوم شنی و لوم استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد تطابق خوبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد. در ادامه، Samadianfard (2009) گسترش پیاز رطوبتی حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار هایدروس را با انجام آزمایش عملی به‌وسیله قطره‌چکان منفرد، تأیید نمود. در مطالعه‌ای، Lazarovitch et al. (2009) با به‌کارگیری تحلیل گشتاور به بررسی توزیع آب زیرسطحی در جوپچه‌ها پرداختند. در این روش داده‌های عددی برای سه نوع خاک لومی، لوم شنی و شن لومی مورد آزمایش قرار گرفت. آن‌ها بیان کردند که تحلیل گشتاور ابزار قدرتمندی در تکمیل شاخص‌های مدیریت آبیاری است و می‌تواند به‌عنوان یک روش کاربردی در شبیه‌سازی توزیع آب در خاک استفاده شود. در

مطالعه دیگری، (Siyal and Skaggs, 2009) در مورد الگوی پخش آب به وجود آمده با لوله‌هایی از جنس سفال به طول ۲۰ متر و عمق ۴۰ سانتی‌متر برای چهار سطح فشار پرداختند. آن‌ها در مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه و شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار هایدروس دویعدی با معیارهای آماری نظیر  $R^2$  و جذر میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) دریافتند که مدل‌ها کارایی خوبی در تعیین شرایط بهینه کارکرد لوله‌های سفالی دارند.

از سایر پژوهش‌ها، (Hinnell et al., 2010) با استفاده از شبکه عصبی<sup>۳</sup> (ANN) به شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای پرداختند. Neuro-Drip یک نرم‌افزار مربوط به شبکه عصبی مصنوعی بر پایه نرم‌افزار اکسل است که برای ارائه تصاویر سریع الگوهای خیس‌شده خاک از قطره‌چکان‌های آبیاری قطره‌ای سطحی طراحی شده است. این پژوهش‌گران مدل‌های عددی را برای سناریوهای مختلف در نظر گرفتند و از نتایج حاصل برای آموزش ANN استفاده کردند. در پژوهشی، (Kazemi et al., 2011) هم‌پوشانی الگوهای خیس‌شدگی خاک تحت قطره‌چکان‌ها را در لوله‌های فرعی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در فاصله‌های متفاوت هم در نرم‌افزار هایدروس با شبیه‌سازی و به‌صورت آزمایش‌های میدانی مورد بررسی قرار دادند و فواصل مناسب را پیشنهاد نمودند. آن‌ها با بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به نتایج مهمی دست یافتند. در این پژوهش، آزمایش‌های میدانی در اراضی ایستگاه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز به‌منظور تعیین ابعاد پیشروی جبهه رطوبتی و توزیع رطوبت خاک اطراف و فاصله بین دو قطره‌چکان در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی انجام شده و نتایج حاصل با شبیه‌سازی‌های عددی دویعدی و سه‌بعدی مدل هایدروس مقایسه شدند. در نهایت، به این نتیجه رسیدند که مدل هایدروس سه‌بعدی با داشتن مقادیر جذر میانگین مربعات خطای کم‌تر و دقت بیش‌تر نسبت به هایدروس دویعدی از کارایی بهتری در شبیه‌سازی ابعاد پیشروی جبهه رطوبتی برخوردار است. در پژوهش دیگری، (Ghorbani, 2013) به ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی الگوی توزیع رطوبت خاک با منبع تغذیه نقطه‌ای در سامانه آبیاری قطره‌ای پرداخت. از طریق انجام آزمایش‌های صحرائی، (Norouzzian et al., 2017) به بررسی الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای با قطره‌چکان‌های زیرسطحی در خاک دو لایه و در دو حالت زمین مسطح و شیب‌دار پرداختند. در این بین به تفسیر اثرات شیب‌دار بودن زمین و لایه‌ای بودن

<sup>2</sup> Root mean square error<sup>3</sup>Artificial neural network<sup>1</sup> Moment analysis

خاک منطقه در آزمایش پرداخته شد. سرانجام نتیجه نشان داد که که نرم‌افزار هایدروس از دقت بالایی در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک تحت شرایط مورد مطالعه برخوردار بود.

در مطالعه‌ای، (Autovino et al. (2018) به بررسی میزان حجم خاک مرطوب شده تحت آبیاری قطره‌ای در یک خاک شنی لومی پرداختند. آن‌ها حجم خاک مرطوب را به‌عنوان تابعی از زمان آبیاری، شرایط اولیه خاک و دبی قطره‌چکان ارائه نمودند. نتایج مقایسه پتانسیل‌های پیش‌بینی شده و نتایج اندازه‌گیری شده بیان می‌کند که مدل هایدروس می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسبی برای طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده شود. نتایج پژوهش (Shiri et al. (2020) که با استفاده از شبیه‌سازی ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و جنگل تصادفی<sup>۱</sup> (RF) نشان داد که با استثنائات جزئی، هر دو مدل GEP<sup>۲</sup> و RF توانایی خوبی در مدل‌سازی ابعاد جبهه رطوبتی در تمام تیمارهای انجام شده ارائه کردند. مدل‌سازی توزیع مجدد جبهه رطوبتی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای با استفاده از سامانه عصبی فازی-تطبیقی بهبود یافته با الگوریتم ازدحام نیز توسط (Kisi et al. (2021) مورد مطالعه قرار گرفت. کاربرد تحلیل گشتاور برای مدل‌سازی توزیع آب در خاک و در آبیاری جویچه‌ای توسط (Kazemi et al. (2021) بررسی شد. آن‌ها اظهار داشتند که نتایج حاصل از تحلیل گشتاور می‌تواند به‌عنوان یک پایگاه بزرگ داده‌ای استفاده شود. بررسی‌های منابع موجود نشان می‌دهد که روش تحلیل گشتاور برای انواع بافت خاک در آبیاری‌های قطره‌ای سطحی و زیرسطحی توسط پژوهش‌گران مورد بررسی قرار گرفته است و در این پژوهش دبی ورودی واحدی در آزمایش‌ها لحاظ شده و اثر تغییر شدت جریان ورودی روی توزیع رطوبت در خاک و عملکرد روش تحلیل گشتاور با لحاظ تغییرات دبی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در پژوهشی، (Moslemi et al. (2021) با استفاده از مدل تحلیل گشتاور به بررسی تحرکات جبهه رطوبتی در یک بافت مشخص با دبی کاربردی متفاوت پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داد که تطابق خوبی بین روش گشتاور و مدل هایدروس وجود داشته و می‌توان برای تغییرات فاصله پیز رطوبتی نسبت به محور افقی و قائم، رابطه منحصر به فردی ارائه نمود. از طرفی مدل مذکور، دقت تخمین قطر توزیع مجدد را در حالت عمودی و افقی بهبود می‌بخشد. هم‌چنین، (Karimi et al. (2022) توزیع مجدد رطوبتی آبیاری قطره‌ای را با استفاده از رویکردهای مبتنی بر رگرسیون بررسی کردند و نتایج حاکی از عملکرد مناسب رگرسیون غیرخطی در زمینه مدل‌سازی پیز رطوبتی بود. Raouf

(et al. (2022) در تحلیل حساسیت نرم‌افزار هایدروس نسبت به داده‌های ورودی در شبیه‌سازی حرکت آب گزارش کردند که مدل دقت بالایی در تخمین منحنی مشخصه آب خاک دارد. (Etminan et al. (2023) با استفاده از روش DREAM به ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی مدل هایدروس پرداختند و چنین گزارش کردند که این الگوریتم بر پایه زنجیره مارکف، یک روش کارآمد در مطالعه میزان تأثیرگذاری روش‌های مدیریتی و شرایط مختلف آزمایشگاهی در ارزیابی عدم قطعیت داده‌های ورودی مدل، پارامترهای هیدرولیکی خاک، ساختار مدل و میزان تأثیرگذاری آن‌ها در عملکرد مدل‌های هیدرولیکی است. در نهایت، (Kumar et al. (2023) به مدل‌سازی اکوهیدرولوژیکی ابعاد الگوی خیس شده خاک تحت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای با سه قطره‌چکان مختلف با ظرفیت‌های دو، چهار و شش لیتر در ساعت با استفاده از پنج رابطه تجربی در خاک لوم شنی پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که مدل (Li et al. (2003) در پیش‌بینی ابعاد جبهه رطوبتی بهترین عملکرد را دارا است. در مطالعه حاضر، علاوه بر بررسی تحرکات جبهه رطوبتی در انواع بافت خاک لحاظ شده در ریزبرنامه رزتا که در نرم‌افزار هایدروس تعریف شده است، تخمین ابعاد جبهه رطوبتی با استفاده از روش تحلیل گشتاور انجام خواهد شد. لذا هدف از این بررسی، شناخت نحوه حرکت پیز رطوبتی و بررسی ابعاد آن در زیر سطح خاک در انواع مختلف بافت خاک تحت جریان‌های متفاوت و ارزیابی قابلیت روش تحلیل گشتاور در شبیه‌سازی این فرآیند در شرایط مختلف است.

## ۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- انجام آزمایش و شبیه‌سازی عددی جبهه رطوبتی  
برای شبیه‌سازی پیز رطوبتی در انواع بافت خاک، اطلاعات دقیقی از خصوصیات فیزیکی خاک، از جمله درصد ذرات تشکیل‌دهنده بافت خاک، چگالی ظاهری و واقعی خاک، تخلخل و هدایت هیدرولیکی اشباع مورد نیاز است. به‌منظور شبیه‌سازی عددی پیشروی جبهه رطوبتی، نرم‌افزار هایدروس استفاده شد. در این پژوهش شبیه‌سازی جبهه رطوبتی در انواع بافت خاک تعریف شده در نرم‌افزار رزتا<sup>۳</sup> که شامل ۱۲ نوع بافت خاک است، انجام شده است. در این آزمایش‌ها منبع تغذیه خاک، به‌صورت سطحی و نقطه‌ای در نظر گرفته شد. کل حجم تغذیه هر نوع بافت خاک ۲۴ لیتر است که این حجم، با دبی‌های مختلف دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعت به‌کار برده شد. به بیان دیگر مدت زمان تغذیه با دبی دو لیتر بر ساعت به مدت ۱۲ ساعت است، تغذیه با

<sup>1</sup> Random forest

<sup>2</sup> Gene expression programming

<sup>3</sup> Rosetta

در این نرم‌افزار و وارد کردن داده‌های مربوط به خاک، چند روش مجزا وجود دارد. در روش اول مقادیر هدایت هیدرولیکی، رطوبت اشباع، رطوبت باقی‌مانده و پارامترهای شکل برای مدل‌های مختلف تعریف می‌شوند. در روش دوم بر اساس مشخص کردن درصد اجزاء تشکیل‌دهنده بافت خاک، یعنی میزان رس، سیلت و شن خصوصیات مربوط به هر بافت خاک تعریف می‌شوند که این کار به کمک شبکه عصبی تعریف شده در نرم‌افزار انجام می‌شود. روش سوم انتخاب کلاس بافت خاک است. در این روش ۱۲ نوع بافت خاک از پیش تعیین شده که حاصل پژوهش Carsel and Parrish (1998) است، در نرم‌افزار تعریف شده است. محدوده‌های هندسی رسم شده برای انواع بافت خاک در این مطالعه به شرح جدول ۱ است:

جدول ۱- انواع بافت خاک

Table 1- Types of soil texture

شماره	بافت خاک	محدوده (سانتی‌متر)	شماره	بافت خاک	محدوده (سانتی‌متر)
1	رس	140*140	7	لوم شنی	140*140
2	لوم رسی	140*140	8	سیلت	140*140
3	لوم رسی سیلتی	140*140	9	لوم رسی سیلتی	140*140
4	شن	220*220	10	لوم سیلتی	140*140
5	رس شنی	220*220	11	شن لومی	140*140
6	لوم شنی رسی	140*140	12	رس سیلتی	140*140

## ۲-۲- شبیه‌سازی تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی

### ۲-۲-۱- تحلیل گشتاور

برای محاسبه گشتاور مکانی دوبعدی الگوی خیس شده از رابطه زیر که توسط Yeh et al. (2005) تعریف شده است، استفاده می‌شود.

$$M_{ik}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \theta_{diff}(x, z, t) x^i z^k dx dz \quad (1)$$

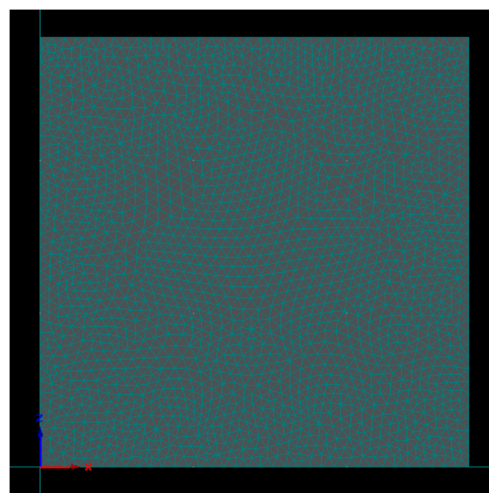
در رابطه بالا،  $\theta(x, z, t)$  مقدار آب در یک زمان معین  $t$  و در یک مکان  $x$  و  $z$  است و  $\theta_{diff}(x, z, t)$  مقدار اولیه آب است. گشتاورهای مکانی صفر، اول و دوم به ترتیب با  $i+k$  مساوی با ۰/۱ یا دو دارد. گشتاور صفر<sup>۱</sup>  $M_{00}$  کل حجم آب است که به مکان مورد نظر اعمال می‌شود. گشتاور اول<sup>۲</sup>  $M_{01}$  و  $M_{10}$  مرکز مکان مورد نظر است که فاصله را نشان می‌دهد و گشتاور درجه دو<sup>۳</sup>  $M_{20}$  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 دوبعدی به صورت زیر است:

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad z_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $x_c$  فاصله مرکز جرم در محور  $x$ ،  $z_c$  فاصله مرکز جرم در محور  $z$  است. برای محاسبه واریانس مکانی در حالت

دبی چهار لیتر بر ساعت به مدت شش ساعت، دبی شش لیتر بر ساعت به مدت چهار ساعت و تغذیه با دبی هشت لیتر بر ساعت به مدت سه ساعت انجام شد. علت استفاده از دبی‌های مذکور، بررسی میزان تغییرات پیاز رطوبتی با استفاده از دبی‌های مختلف است و از طرفی باید کل حجم تغذیه در هر نوع بافت خاک یکسان باشد. لذا ۲۴ لیتر به عنوان کوچک‌ترین مضرب مشترک دبی‌های کاربردی در این مطالعه انتخاب شد. نحوه توزیع رطوبت در خاک و جبهه رطوبتی توسط نرم‌افزار هایدروس شبیه‌سازی شده و نتایج در بازه زمانی یک ساعت به ثبت رسید. از داده‌های استخراج شده توسط نرم‌افزار، برای محاسبه گشتاورها استفاده شد. دقت مدل حاصل از روش گشتاور بر مبنای نتایج حاصل از مدل هایدروس مورد ارزیابی قرار داده شد. برای انجام شبیه‌سازی

شکل ۱ الگوی شبکه استفاده شده در نرم‌افزار هایدروس را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که شرط اولیه، مقدار رطوبت حجمی و شرط مرزی به صورت شار ثابت در محل قطره‌چکان و شرط زهکشی آزاد در مرز پایینی محدوده انتخاب شده است.



شکل ۱- الگوی شبکه استفاده شده در نرم‌افزار هایدروس

Figure 1- Network template used in Hydrus software

<sup>1</sup> Zero moments

<sup>2</sup> First moments

<sup>3</sup> Second moments

یک ضریب  $k$  استفاده می‌شود که مقدار مناسب آن به واسطه حداقل‌سازی اختلاف بین مدل و نتایج هایدروس، از رابطه (۵) تعیین شده است.

$$\frac{\sum M}{\sum M_{00}} \cong 1 \quad (5)$$

در روابط فوق  $x$  و  $z$  مختصات مکان مورد نظر بوده و  $k^2$  ضریب است،  $M$  مقدار کل حجم آب در داخل بیضی رسم شده است،  $M_{00}$  مقدار کل حجم آب موجود در منطقه مورد نظر در هر بازه زمانی است. هر چه مقدار محاسبه شده برای رابطه (۵) نزدیک به یک باشد، بیان‌گر مقدار مناسب ضریب  $k$  و انطباق مناسب بیضی رسم شده با جبهه رطوبتی شبیه‌سازی شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی انواع بافت خاک

با انتخاب هر یک از بافت‌های خاک تعیین شده در نرم‌افزار رزتا، شبیه‌سازی جبهه رطوبتی حاصل از دبی‌های مشخص انجام شده است. محدوده شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار هایدروس برای انواع بافت خاک‌ها با کاربرد دبی‌های دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعت با حجم تغذیه ۲۴ لیتر و رطوبت اولیه مشخصی یعنی  $\theta_0$  مساوی با ۰/۱ انجام شد. نتایج شبیه‌سازی محدوده مرطوب برای ساعات ابتدایی و انتهایی شبیه‌سازی برای دبی دو لیتر بر ساعت به‌عنوان نمونه برای خاک با بافت شن در شکل ۲ ارائه شده است.

دو بعدی در جهت‌های  $x$  و  $z$  به‌صورت زیر است (Radcliffe and Šimunek, 2010):

$$\sigma_x^2 = \frac{M_{z0}}{M_{00}} - x_c^2, \quad \sigma_z^2 = \frac{M_{0z}}{M_{00}} - z_c^2 \quad (3)$$

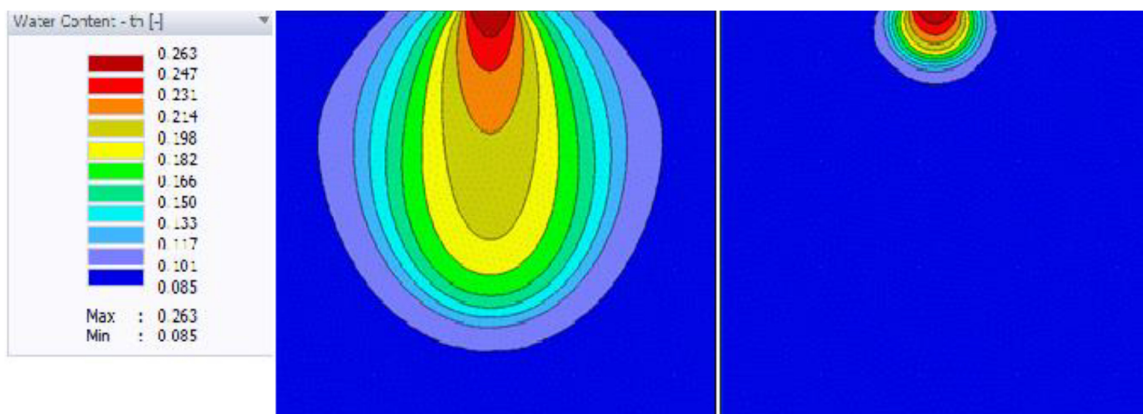
در این پژوهش هدف از برنامه‌نویسی تقسیم محدوده مورد نظر به قسمت‌های مساوی و پیدا کردن مختصات مرکز هر قسمت و مقدار رطوبت نزدیک‌ترین گره به مرکز هر قسمت است تا به این طریق گشتاورها محاسبه شود. با استفاده از برنامه‌نویسی محدود به مربع‌های چهار در چهار سانتی‌متر تقسیم شد، در هر محور ۲۶ مربع ایجاد شد و در نهایت برنامه مورد نظر اجرا شد.

#### ۲-۲-۲- رسم بیضی حاصل از محاسبات گشتاور

بیضی‌ها بر اساس خروجی‌های حاصل از مدل تحلیل گشتاورها در نرم‌افزار اکسل رسم شده است که هر کدام از این بیضی‌ها دارای عمق و عرض هستند. لذا عمق و عرض حاصل از این بیضی‌ها با عمق و عرض حاصل از مدل هایدروس (به‌عنوان مدل مبنا) مورد مقایسه قرار گرفت. رابطه بیضی در حالت کلی به این قرار است:

$$\frac{(x - x_c)^2}{(k^2 \sigma_x^2)} + \frac{(z - z_c)^2}{(k^2 \sigma_z^2)} \leq 1 \quad (4)$$

یکی از اهداف مطالعه حاضر رسم بیضی در زمان‌های متفاوت و با کاربرد دبی‌های مختلف است که این بیضی منطبق بر پیاز رطوبتی حاصل از مدل هایدروس است. در رسم بیضی از



شکل ۲- نتایج شبیه‌سازی محدوده مرطوب شده برای ساعات ابتدایی و انتهایی برای دبی دو لیتر بر ساعت  
Figure 2- Simulation results of the moistened area for the beginning and end hours at a flow rate of two L hr<sup>-1</sup>

۰/۴۵۹ است و میزان پخش‌شدگی آب با گذشت زمان در محورهای  $x$  و  $z$  افزایش می‌یابد.

#### ۳-۲- بررسی نتایج تحلیل گشتاورها

به‌منظور محاسبه گشتاورها، اولین قدم به‌دست آوردن مقادیر  $M_{00}$  است. جدول ۲ مقادیر  $M_{00}$  محاسبه شده را نشان می‌دهد. با

بررسی‌های حاصل از شبیه‌سازی در انواع بافت خاک نشان می‌دهد حرکت و رفتار جبهه رطوبتی در انواع بافت خاک با توجه به ذرات تشکیل‌دهنده آن‌ها متفاوت است. همچنین، میزان دبی ورودی به خاک در رفتار پیاز رطوبتی تأثیر گذار است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۲ نشان می‌دهد که مقدار رطوبت حجمی اولیه ۰/۱۰۰ و مقدار رطوبت حجمی در حالت اشباع

در دبی کم میزان آب توزیع شده بیش‌تر برآورد شده است. عملکرد ضعیف مدل هایدروس در شرایط فوق‌الذکر قابل تفسیر و بیان بوده و خارج از محدوده پژوهش حاضر است. توجه به این نکته ضروری است که در مدل تحلیل گشتاورها، خروجی مدل هایدروس شبیه‌سازی شده و دقت ذاتی آن مرتبط با دقت مدل هایدروس ناست. لذا، دقت و عملکرد مدل تحلیل گشتاورها در مباحث بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

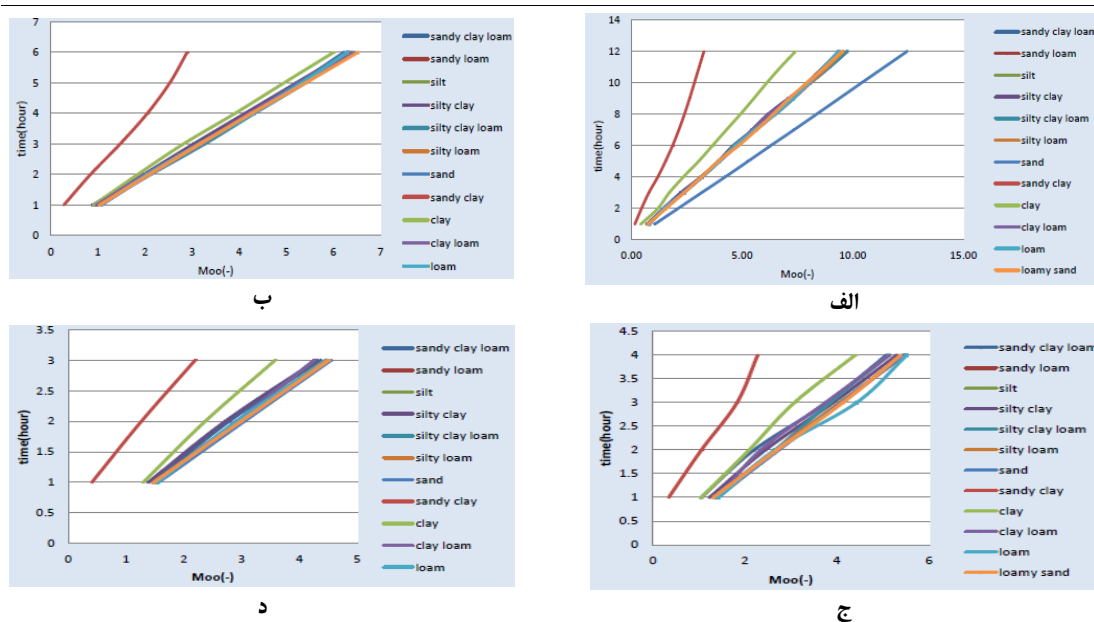
با توجه به شکل ۳ می‌توان دریافت که در خاک رس شنی به دلیل نفوذ پذیری بسیار کم و پایین بودن هدایت هیدرولیکی اشباع، نسبت به سایر بافت‌ها، میزان توزیع رطوبت در زیر سطح خاک کم‌تر بوده و احتمال تشکیل رواناب در سطح خاک با افزایش زمان آبیاری وجود دارد. قدم بعدی مقایسه مقادیر  $Z_c$  مرکز جرم رطوبت در محدوده پیزا رطوبتی، در گام‌های زمانی مختلف در انواع بافت خاک و تحت دبی‌های متفاوت است (جدول ۳).

توجه به نتایج مندرج در جدول ۲، مقایسه توزیع رطوبت در تمام بازه‌های زمانی و در تمام بافت خاک‌ها مورد قبول بوده و مقادیر رطوبت زیرسطحی توزیع یافته مشابه‌اند. برای بررسی بهتر، مقادیر رطوبت برای هر دبی در هر بازه زمانی در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق منحنی‌های ارائه شده در این شکل، خطوط مربوط به میزان آب توزیع شده به ازای زمان در تمام بافت‌های خاک برای هر دبی کاربردی تقریباً روی هم منطبق هستند و نشان‌گر این است که در زمان مورد نظر جرم آب مشخصی در خاک توزیع شده است. البته به لحاظ فیزیک موضوع، این امر کاملاً بدیهی است ولی چند خط در شکل‌ها دیده می‌شوند که از این امر مستثنا هستند و بیان‌گر آن است که مدل هایدروس نتوانسته است این موارد را به‌خوبی شبیه‌سازی کند که به اختصار ذکر می‌شوند. در تمام دبی‌های به‌کار برده شده در بافت رس شنی (دانه ریز)، حجم آب توزیع شده از شبیه‌سازی کم‌تر حاصل شده است. این پدیده با شدت کم‌تر برای خاک رسی در دبی‌های بیش‌تر قابل ملاحظه است، در صورتی که در بافت درشت شنی

جدول ۲- مقادیر  $M_{00}$  (سانتی‌متر) برای دبی‌های کاربردی دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعتTable 2-  $M_{00}$  (cm) values for applied flow rates of two, four, six, and eight L hr<sup>-1</sup>

ساعت/بافت	شن لومی	لوم	لوم رسی	رس	رس شنی	شن	لوم سیلتی	لوم رسی سیلتی	رس سیلتی	سیلت	لوم شنی	لوم رسی شنی
دبی دو لیتر بر ساعت												
1	0.75	0.81	0.78	0.42	0.15	1.05	0.76	0.74	0.69	0.75	0.81	0.81
2	1.56	1.47	1.44	1.19	0.45	2.10	1.47	1.47	1.44	1.51	1.50	1.43
3	2.38	2.37	1.71	0.78	1.71	3.16	2.31	2.31	2.34	2.37	2.37	2.32
4	3.16	3.18	2.34	1.18	4.23	3.16	3.17	3.17	3.12	3.15	3.15	3.15
5	3.92	3.98	3.03	1.53	5.26	3.95	3.97	3.91	3.91	3.92	3.92	3.92
6	4.83	4.68	3.66	1.85	6.29	4.72	4.77	4.70	4.72	4.59	4.66	4.59
7	5.65	5.55	4.28	2.14	7.34	5.61	5.52	5.43	5.43	5.50	5.63	5.50
8	6.40	6.50	4.92	2.39	8.36	6.49	6.29	6.16	6.16	6.50	6.46	6.50
9	7.12	7.29	5.52	2.62	9.38	7.30	7.19	7.08	7.08	7.33	7.23	7.33
10	7.92	8.01	6.11	2.84	10.40	8.08	8.11	8.05	8.05	8.07	7.93	8.07
11	8.76	8.68	6.74	3.05	11.42	8.85	8.96	8.95	8.95	8.75	8.66	8.75
12	9.52	9.34	7.41	3.27	12.45	9.58	9.76	9.74	9.74	9.42	9.39	9.42
دبی چهار لیتر بر ساعت												
1	1.03	1.07	0.91	0.28	1.05	1.03	0.95	0.89	1.02	1.08	1.04	1.04
2	2.09	2.05	1.84	0.84	2.11	2.05	2.12	1.97	2.04	2.07	1.99	1.99
3	3.17	3.16	2.81	1.47	3.17	3.14	3.27	3.03	3.12	3.15	3.11	3.11
4	4.26	4.28	3.91	2.05	4.23	4.27	4.33	4.12	4.26	4.29	4.22	4.22
5	5.41	5.33	4.95	2.53	5.27	5.29	5.41	5.21	5.29	5.22	5.26	5.26
6	6.52	6.29	6.00	2.90	6.27	6.32	6.45	6.31	6.31	6.35	6.22	6.22
دبی شش لیتر بر ساعت												
1	1.31	1.43	1.05	0.35	1.38	1.34	1.42	1.24	1.32	1.40	1.05	1.05
2	2.70	2.65	2.09	1.06	2.74	2.67	2.66	2.45	2.66	2.69	2.20	2.20
3	4.13	4.10	3.08	1.83	4.10	4.07	3.85	3.92	4.06	4.11	3.79	3.79
4	5.38	5.52	4.39	2.53	5.45	5.48	5.13	5.30	5.47	5.44	5.08	5.08
دبی هشت لیتر بر ساعت												
1	1.47	1.55	1.29	0.41	1.56	1.49	1.49	1.38	1.47	1.54	1.47	1.47
2	2.99	2.91	2.37	1.26	3.05	2.93	2.91	2.71	2.93	2.96	2.78	2.78
3	4.51	4.48	3.58	2.19	4.55	4.46	4.26	4.30	4.45	4.46	4.37	4.37





شکل ۳- مقایسه مقادیر  $M_{00}$  (سانتی متر) نسبت به زمان با دبی های کاربردی دو (الف)، چهار (ب)، شش (ج) و هشت (د) لیتر بر ساعت  
Figure 3 - Comparison of  $M_{00}$  values (centimeters) over time with applied flow rates of two (a), four (b), six (c), and eight (d)  $L\ hr^{-1}$

جدول ۳- مقادیر  $Z_c$  (سانتی متر) برای دبی های کاربردی دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعت  
Table 3-  $Z_c$  values for applied flow rates of two, four, six, and eight  $L\ hr^{-1}$

ساعت / بافت	شن لومی	لوم	لوم رسی	رس	رس شنی	شن	لوم سیلتی	لوم رسی سیلتی	رس سیلتی	سیلت	لوم شنی	لوم رسی شنی
دبی دو لیتر بر ساعت												
1	-5.60	-5.56	-5.56	-5.50	-3.24	-10.78	-5.56	-5.55	-5.55	-5.56	-5.56	-5.56
2	-8.54	-7.34	-6.29	-5.59	-3.54	-17.53	-7.58	-6.20	-6.11	-7.55	-7.80	-7.40
3	-10.66	-9.29	-8.85	-6.34	-3.71	-23.24	-9.18	-8.31	-8.39	-9.09	-9.75	-9.57
4	-12.51	-10.97	-10.08	-7.78	-3.97	-28.69	-10.82	-9.59	-9.83	-10.71	-11.76	-11.28
5	-14.14	-12.40	-11.44	-9.03	-4.10	-33.64	-12.05	-10.85	-11.03	-11.92	-13.08	-12.76
6	-16.16	-13.27	-12.62	-10.12	-4.19	-38.48	-13.00	-11.98	-12.21	-12.89	-14.51	-13.62
7	-17.62	-14.67	-13.36	-11.15	-4.29	-43.29	-14.46	-12.78	-13.08	-14.31	-16.46	-15.33
8	-18.84	-16.18	-14.21	-12.09	-4.45	-47.77	-15.66	-13.58	-13.85	-15.46	-17.67	-16.94
9	-20.06	-17.19	-15.38	-12.83	-4.67	-52.13	-16.60	-14.78	-15.10	-16.40	-18.80	-18.02
10	-21.66	-18.05	-16.37	-13.56	-4.96	-56.46	-17.43	-15.90	-16.36	-17.22	-19.77	-18.97
11	-23.31	-18.78	-17.11	-14.46	-5.36	-60.75	-18.13	-16.76	-17.34	-17.92	-20.94	-19.77
12	-24.64	-19.45	-17.65	-15.48	-5.79	-64.96	-18.78	-17.49	-18.13	-18.59	-22.08	-20.56
دبی چهار لیتر بر ساعت												
1	-5.40	-5.37	-5.39	-5.38	-3.37	-8.86	-5.35	-5.37	-5.39	-5.35	-5.37	-5.38
2	-8.25	-7.01	-6.01	-5.75	-3.87	-14.98	-7.25	-5.86	-5.80	-7.21	-7.44	-7.10
3	-10.81	-9.33	-8.60	-7.78	-4.13	-20.60	-9.24	-7.93	-8.06	-9.13	-9.80	-9.55
4	-12.93	-11.45	-10.28	-9.64	-4.28	-25.84	-11.19	-9.58	-9.83	-11.02	-12.17	-11.79
5	-15.32	-12.98	-12.05	-11.26	-4.42	-30.75	-12.51	-11.22	-11.48	-12.32	-13.60	-13.29
6	-17.28	-14.38	-13.24	-12.64	-4.67	-35.38	-13.96	-12.53	-12.83	-13.70	-15.95	-14.96
دبی شش لیتر بر ساعت												
1	-5.40	-5.24	-5.22	-5.06	-3.46	-9.14	-5.27	-5.19	-5.19	-5.27	-5.25	-5.35
2	-8.79	-7.76	-6.07	-5.38	-4.01	-15.89	-7.77	-6.02	-6.06	-9.13	-8.17	-7.06
3	-11.79	-10.31	-9.04	-6.98	-4.28	-22.04	-10.04	-8.71	-8.88	-11.45	-10.91	-9.67
4	-13.99	-12.63	-11.36	-9.14	-4.44	-27.84	-12.07	-10.86	-10.79	-13.23	-13.18	-12.12
دبی هشت لیتر بر ساعت												
1	1.47	-5.16	-5.10	-5.05	-3.53	-8.63	-5.20	-5.10	-5.09	-5.20	-5.18	-5.14
2	2.99	-7.36	-6.14	-5.44	-4.08	-15.37	-7.57	-5.86	-5.77	-7.52	-7.82	-7.34
3	4.51	-9.99	-9.20	-7.36	-4.34	-21.61	-9.68	-8.52	-8.57	-9.50	-10.43	-10.18

به هر بافت خاک، میزان نفوذ عمقی و پیشروی رطوبت تقریباً ثابت می ماند. با توجه به داده های ثبت شده در این پژوهش، مدت زمان فرآیند آبیاری با یک حجم مشخص برای تغذیه اراضی با میزان نفوذ عمقی رابطه مستقیم دارد. یعنی با کاربرد دبی کمتری برای تغذیه زمین با مدت زمان بیش تر آبیاری، این فرصت به

بررسی مقادیر حاصل  $Z_c$  به خوبی حرکت جریان آب از سطح خاک به قسمت عمقی را نشان می دهد. یعنی با گذشت زمان از شروع فرآیند آبیاری فرآیند نفوذ شروع شده و ادامه می یابد. شدت این فرآیند در ابتدای آبیاری زیاد است اما با گذشت زمان از شیب شدت نفوذ کاسته می شود و حتی بعد از مدت زمان متفاوت نسبت

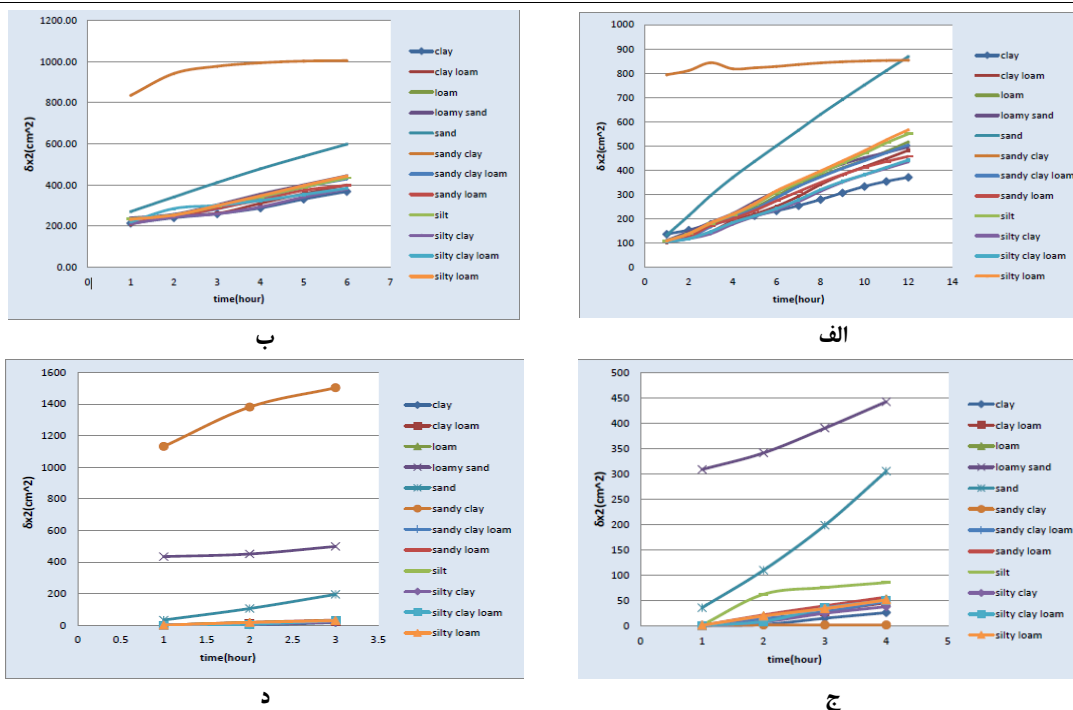
آبیاری مقادیر  $\sigma_{x2}$  شیب صعودی دارد. همچنین، با افزایش میزان دبی ورودی، بازه تغییرات واریانس کوچک‌تر، اما مقادیر واریانس بیش‌تر می‌شود. بیش‌ترین مقدار واریانس مربوط به خاک رس شنی با دبی کاربردی هشت لیتر بر ساعت با مقدار  $15.03/3$  سانتی‌متر مربع بوده و کم‌ترین مقدار مربوط به بافت رس با دبی کاربردی چهار لیتر بر ساعت با مقدار  $214/41$  سانتی‌متر مربع است. به‌دلیل بیش‌تر بودن زمان آبیاری در دبی کاربردی دو لیتر بر ساعت، مقادیر به‌دست آمده واریانس بیش‌تر شده و کم‌ترین مقدار در کاربرد دبی چهار لیتر بر ساعت به‌دست آمده است از این‌رو، مشخص می‌شود که تأثیر مدت زمان آبیاری، نسبت به شدت دبی، بر مقادیر واریانس بیش‌تر است (شکل ۴). علاوه‌بر این، جدول ۵ مقادیر  $\sigma_{z2}$  انواع بافت خاک با دبی‌های مختلف نشان می‌دهد.

رطوبت توزیع شده داده می‌شود که نفوذ بیش‌تری در خاک داشته باشد. در این پژوهش، پس از ۲۴ ساعت و اتمام تغذیه خاک‌ها، بیش‌ترین میزان نفوذ عمقی صورت گرفته مربوط به بافت شنی، با کاربرد متفاوت دبی دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعت به‌ترتیب  $64/95$ ،  $35/38$ ،  $27/84$  و  $21/61$  سانتی‌متر بود. همچنین، کم‌ترین میزان نفوذ عمقی مربوط به بافت رس شنی بود. در مرحله بعد برای محاسبه گشتاورها واریانس مکانی نسبت به محور Z و محور X به‌دست آورده شد. در واقع مقادیر  $\sigma_{x2}$  و  $\sigma_{z2}$  به‌ترتیب نشان‌دهنده گسترش عمقی و افقی پیاز رطوبتی هستند که با استفاده از مقادیر  $M_{00}$  و  $Z_c$  به‌دست آمده، برآورد مقادیر  $\sigma_{x2}$  و  $\sigma_{z2}$  انجام شد که در جدول ۴ قابل مشاهده است. با افزایش مدت زمان آبیاری مقادیر  $\sigma_{x2}$  دچار تغییر می‌شود (جدول ۴). یعنی در حالت کلی با گذشت زمان از شروع فرآیند

جدول ۴- مقادیر  $\sigma_x^2$  (سانتی‌مترمربع) برای دبی‌های کاربردی دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعت

Table 4- Values of  $\sigma_x^2$  (cm<sup>2</sup>) for applied flow rates of two, four, six, and eight L hr<sup>-1</sup>

لوم رسی	لوم شنی	سیلت	رس	لوم رسی	لوم	شن	رس شنی	رس	لوم رسی	لوم	شن لومی	ساعت/بافت
دبی دو لیتر بر ساعت												
106.25	109.16	109.89	108.21	105.41	109.65	134.03	793.91	137.59	103.88	107.85	112.03	1
121.83	127.55	140.00	119.01	119.06	138.75	213.58	811.21	154.49	120.17	126.50	147.22	2
168.26	173.08	181.90	139.37	148.11	183.73	296.71	843.70	178.74	147.28	175.30	186.35	3
208.76	201.08	217.25	178.55	184.99	219.71	370.63	818.54	196.08	192.29	209.62	222.56	4
240.50	234.56	259.38	210.34	212.59	263.15	437.24	822.64	214.00	220.44	246.88	270.66	5
287.33	275.04	310.17	238.19	242.73	316.23	501.69	828.31	233.36	252.34	294.50	314.22	6
334.54	313.16	350.46	271.83	279.57	357.52	565.57	836.28	255.03	293.44	343.85	354.42	7
372.58	350.19	390.05	314.04	320.79	397.68	630.54	843.02	279.96	341.67	378.66	392.36	8
408.05	383.39	430.09	351.63	354.83	439.16	691.79	847.72	307.44	381.92	411.15	426.25	9
439.78	412.88	471.02	381.58	383.04	481.16	751.88	850.73	333.97	415.03	443.40	452.49	10
472.41	436.91	514.09	408.65	413.21	526.16	811.06	852.94	354.85	448.52	478.38	473.77	11
505.51	458.21	550.88	435.62	443.27	567.51	868.91	854.10	371.76	483.14	517.89	496.95	12
دبی چهار لیتر بر ساعت												
215.05	1.08	1.02	211.87	220.74	233.35	270.78	836.49	214.41	209.69	221.29	239.99	1
250.20	2.07	2.04	244.43	285.48	253.56	341.88	942.57	240.85	254.11	250.91	257.72	2
283.69	3.15	3.12	260.16	300.88	299.47	412.08	977.61	260.41	262.11	289.09	304.01	3
337.55	4.29	4.26	293.63	324.53	347.71	479.04	994.30	288.19	310.96	340.57	355.87	4
390.71	5.22	5.29	341.48	353.71	397.35	540.21	100.79	331.14	358.20	389.24	401.03	5
435.05	6.35	6.31	380.53	384.52	444.01	598.88	1005.19	368.46	400.65	435.89	445.26	6
دبی شش لیتر بر ساعت												
245.97	291.43	302.01	308.55	342.83	299.14	366.09	863.64	381.77	292.96	289.84	308.80	1
332.42	321.54	403.57	314.27	366.29	332.62	431.25	1039.32	378.54	322.62	323.04	341.46	2
412.81	379.04	467.43	340.02	391.87	389.10	506.75	1125.79	399.76	368.95	388.32	390.40	3
440.88	422.70	500.82	399.91	429.16	440.77	576.01	1187.01	424.29	425.42	437.75	442.63	4
دبی هشت لیتر بر ساعت												
384.24	407.01	426.15	390.77	431.33	422.24	515.44	1131.52	467.70	381.96	397.66	434.19	1
443.97	438.13	441.30	430.58	458.69	441.42	570.75	1380.90	471.65	449.15	442.57	451.07	2
483.58	484.57	500.20	449.94	484.18	502.66	641.04	1503.30	495.37	457.75	489.61	498.95	3



شکل ۴- مقایسه مقادیر  $\sigma_z^2$  (cm<sup>2</sup>) در انواع بافت خاک با دبی های کاربردی دو (الف)، چهار (ب)، شش (ج) و هشت (د) لیتر بر ساعت  
Figure 4- Comparison of  $\sigma_z^2$  (cm<sup>2</sup>) values in different types of soil texture with the mentioned applied flow rates two (a), four (b), six (c), and eight (d) L hr<sup>-1</sup>

جدول ۵- مقادیر  $\sigma_z^2$  (سانتی متر) برای دبی های کاربردی دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعت

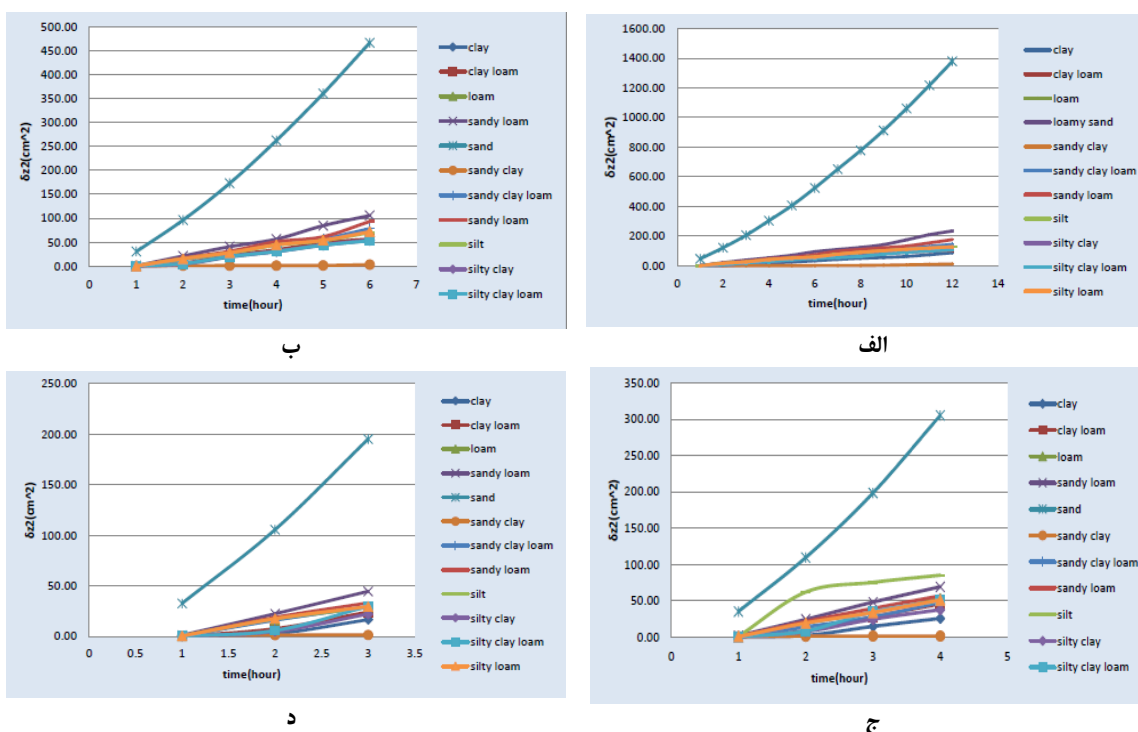
Table 5- Values of  $\sigma_z^2$  (cm<sup>2</sup>) for applied flow rates of two, four, six, and eight L hr<sup>-1</sup>

لوم رسی	لوم شنی	سیلت	رس	لوم رسی	لوم	رس	لوم رسی	لوم	رس	لوم رسی	لوم	شن	ساعت / بافت
دبی دو لیتر بر ساعت													
0.21	0.22	0.26	0.22	0.21	0.24	46.81	0.32	0.24	0.21	0.22	0.57	1	
15.14	17.42	16.06	5.44	6.17	16.21	122.05	0.84	1.05	7.00	14.73	21.13	2	
25.73	28.76	26.24	20.37	20.14	26.58	206.08	1.03	7.97	22.13	25.15	38.59	3	
42.64	47.38	41.15	28.73	28.54	41.66	304.50	1.31	18.19	30.99	40.78	53.74	4	
55.22	57.11	51.20	40.68	40.35	51.77	406.46	1.38	25.79	44.69	52.89	71.03	5	
60.97	74.27	59.50	51.38	50.04	59.67	524.71	1.41	34.18	54.43	58.73	94.72	6	
83.92	97.76	77.22	57.47	55.63	77.70	651.80	1.59	43.28	59.06	76.47	109.90	7	
101.44	109.59	90.57	65.18	63.69	91.41	777.91	2.54	50.72	68.63	93.86	123.41	8	
110.73	121.34	100.87	81.25	78.57	101.64	913.31	4.06	56.02	82.76	104.10	142.52	9	
120.97	133.37	110.45	95.45	91.04	111.25	1060.80	6.34	63.20	92.66	114.94	174.58	10	
131.30	154.42	118.54	104.36	99.71	119.32	1217.11	9.52	74.87	99.30	124.75	209.06	11	
144.17	176.62	127.31	112.21	107.60	127.77	1378.85	12.76	87.92	104.57	134.35	234.17	12	
دبی چهار لیتر بر ساعت													
0.32	0.35	0.45	0.31	0.32	0.42	30.62	0.55	0.32	0.31	0.34	0.86	1	
14.69	16.85	15.55	4.34	5.27	15.76	96.44	1.23	3.87	6.30	14.11	21.37	2	
28.40	31.18	27.73	20.43	20.10	28.31	173.27	1.38	18.99	22.87	27.33	40.85	3	
47.35	50.99	43.75	30.99	30.67	44.65	262.62	1.41	30.29	34.43	45.06	56.59	4	
57.28	61.55	53.54	44.85	44.07	54.22	360.48	1.63	43.48	49.27	55.59	84.70	5	
78.49	93.50	70.28	54.56	53.25	72.03	466.70	3.25	53.67	56.92	72.23	105.88	6	
دبی شش لیتر بر ساعت													
0.32	0.53	0.90	0.40	0.40	0.77	35.31	0.72	0.42	0.40	0.45	1.80	1	
14.06	21.33	61.91	7.55	8.33	19.35	109.52	1.37	2.34	8.92	19.29	24.29	2	
27.62	39.42	75.27	24.48	34.76	33.87	198.39	1.47	14.74	27.76	33.99	48.03	3	
48.03	56.72	85.14	37.65	49.81	50.91	305.17	1.45	25.80	45.69	52.78	69.24	4	
دبی هشت لیتر بر ساعت													
0.43	0.46	0.63	0.43	0.41	0.59	32.72	0.85	0.40	0.43	0.44	1.29	1	
16.17	18.88	17.35	4.97	5.95	17.66	105.67	1.44	2.76	7.83	16.34	22.50	2	
29.65	33.27	28.77	22.15	29.75	29.61	195.28	1.51	16.66	24.20	29.10	44.61	3	

آبیاری ۱۲ ساعت به انجام رسیده است. همچنین، کم‌ترین مقدار مربوط به بافت رس شنی با مقدار ۱/۴۵ سانتی‌متر مربع بوده که شبیه‌سازی با دبی کاربردی شش لیتر بر ساعت و با مدت زمان آبیاری چهار ساعت به انجام رسیده است.

شکل ۵ تغییرات  $\sigma_z^2$  را نسبت به زمان در انواع مختلف بافت‌های خاک نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بیش‌ترین تغییرات  $\sigma_z^2$  نسبت به زمان در خاک با بافت شنی است و کم‌ترین تغییرات مربوط به خاک با بافت رس شنی است.

با توجه به نتایج جدول ۵ و بررسی محاسبات انجام یافته، می‌توان چنین نتیجه گرفت که با تغییر دبی کاربردی در انواع بافت خاک، مقادیر  $\sigma_z^2$  با تغییر مواجه می‌شوند. به بیان دیگر با افزایش میزان دبی کاربردی،  $\sigma_z^2$  افزایش یافته و شیب این افزایش در هر بافت خاک با توجه به خصوصیات آن بافت متفاوت است. همچنین، تأثیر مدت زمان آبیاری در مقدار  $\sigma_z^2$  مشهود است. به بیان دیگر هر چه مدت زمان آبیاری بیش‌تر باشد مقدار واریانس دچار تغییر بیش‌تری می‌شود. با توجه به مقادیر به‌دست آمده بیش‌ترین مقدار  $\sigma_z^2$  مربوط به بافت شنی که برابر با ۱۳۷۸/۸ سانتی‌متر مربع است که شبیه‌سازی با دبی کاربردی دو لیتر بر ساعت و مدت زمان



شکل ۵- مقایسه مقادیر  $\sigma_z^2$  (cm<sup>2</sup>) در انواع بافت خاک با دبی‌های کاربردی دو (الف)، چهار (ب)، شش (ج) و هشت (د) لیتر بر ساعت  
Figure 5- Comparison of  $\sigma_z^2$  (cm<sup>2</sup>) values in different types of soil texture with applied discharges two (a), four (b), six (c), and eight (d) L hr<sup>-1</sup>

۳-۳- مقایسه ابعاد جبهه رطوبتی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار هایدروس با بیضی حاصل از محاسبات گشتاورها همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل متفاوت بودن مقدار رطوبت اعمال شده به منطقه مورد نظر در زمان بندی مختلف، مقدار  $Z_c$ ،  $\sigma_x^2$ ،  $\sigma_z^2$  متفاوت بوده و باعث ایجاد تغییر در اندازه بیضی‌ها در دبی‌های مختلف شده است. افزایش اندازه بیضی‌ها نشان‌دهنده پخش‌شدگی زیاد آب در آن منطقه است. برای مقایسه بهتر بیضی رسم شده توسط نتایج حاصل از محاسبات گشتاورها با مدل هایدروس شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار هایدروس جدول‌های ۶ تا ۹ قابل ارائه شده است.

۳-۳- تعیین مقدار ضریب K- با کاربرد دبی‌های دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعت در انواع بافت خاک تعیین میزان K در رسم بیضی با استفاده از رابطه (۴) به انجام رسیده است. مقدار K به‌دست آمده برای رسم بیضی حاصل از محاسبات گشتاورها، برابر با ۲/۵ است. با قرار دادن مقدار ۲/۵ در رابطه فوق، شکل بیضی حاصل شده با جبهه رطوبتی حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار هایدروس، بیش‌ترین انطباق را خواهد یافت.

نتایج ارائه شده در جدول ۷ برای برآورد عرض و عمق پیاز رطوبتی نشان داد که نتایج حاصل برای عمق نفوذ در ساعت ابتدایی با استفاده از مدل هایدروس دو برابر بوده و این در حالی است که برای ساعت انتهایی این اختلاف کاهش پیدا می‌کند. در مورد عرض پیاز رطوبتی در هر دو ساعت ابتدایی و انتهایی مقادیر تا حدودی نزدیک به هم برآورد شده است و لازم به ذکر است مقادیر عرض حاصل شده از روش گشتاور بزرگ‌تر است. جدول ۸ نتایج عمق و عرض پیاز رطوبتی حاصل از هایدروس و ابعاد بیضی رسم شده از محاسبات گشتاورها را برای دبی شش لیتر بر ساعت نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶، با مقایسه عمق و عرض پیاز رطوبتی حاصل از هایدروس و بیضی رسم شده با دبی کاربردی دو لیتر بر ساعت مشخص شد که عمق نفوذ حاصل از هایدروس در ساعت ابتدایی دو برابر عمق نفوذ حاصل از بیضی است. این در حالی است که در ساعت انتهایی نتایج حاصل برای عمق نفوذ با استفاد از دو روش تقریباً برابر است، به طوری که در خاک با بافت شن میزان خطای حاصل ۲۲ میلی‌متر است. مقایسه نتایج حاصل برای عمق نشان داد که هر دو مدل عملکرد تقریباً نزدیک به هم در محاسبه عمق پیاز رطوبتی داشته‌اند. بیشترین میزان خطا مربوط به بافت رس شنی است.

جدول ۶- مقایسه عمق و عرض پیاز رطوبتی حاصل از هایدروس با ابعاد بیضی رسم شده از محاسبات گشتاورها با دبی کاربردی دو لیتر بر ساعت (بر حسب سانتی‌متر)

Table 6- Comparison of the depth and width of the moisture bulb obtained from Hydrus with the dimensions of the ellipse drawn from the Moment calculations with an applied flow rate of two L hr<sup>-1</sup> (in cm)

بافت	نتایج حاصل از هایدروس در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از گشتاور در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از گشتاور در ساعت انتهایی		بافت
	عمق نفوذ	عرض نفوذ	عمق بیضی	عرض بیضی	عمق نفوذ	عرض نفوذ	
رس	11.1	27.45	6.73	29.32	40	44.33	رس
لوم رسی	11.56	25	6.7	25.47	46.1	48.41	لوم رسی
لوم	12.33	25.22	6.72	25.96	50.7	51.35	لوم
شن لومی	14	25.5	7.49	26.45	62.3	62.89	شن لومی
شن	34.3	20	27.89	28.94	158	84.3	شن
رس شنی	4.3	48.9	4.64	70.44	17.5	56.9	رس شنی
لوم رسی شنی	12.2	25.4	6.72	25.76	52.6	69.1	لوم رسی شنی
لوم شنی	12.5	25.9	6.73	26.12	57	50	لوم شنی
سیلت	12.4	25.5	6.83	26.2	50.5	54.36	سیلت
رس سیلتی	11.7	25	6.71	26	45.1	47	رس سیلتی
لوم رسی سیلتی	11.8	25	6.71	25.66	44.5	48.4	لوم رسی سیلتی
لوم سیلتی	12.55	25.57	6.77	26.17	50.3	54.5	لوم سیلتی

جدول ۷- مقایسه عمق و عرض پیاز رطوبتی حاصل از هایدروس با ابعاد بیضی رسم شده از محاسبات گشتاورها با دبی کاربردی چهار لیتر بر ساعت (بر حسب سانتی‌متر)

Table 7- Comparison of the depth and width of the moisture bulb obtained from Hydrus with the oval dimensions drawn from the Moment calculations with an applied flow rate of four L hr<sup>-1</sup> (in cm)

بافت	نتایج حاصل از هایدروس در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از گشتاور در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از گشتاور در ساعت انتهایی		بافت
	عمق نفوذ	عرض نفوذ	عمق بیضی	عرض بیضی	عمق نفوذ	عرض نفوذ	
رس	10.52	32.5	6.79	36.6	33.08	44	رس
لوم رسی	11.30	32	6.78	36.2	35.86	45.24	لوم رسی
لوم	11.93	32.9	6.82	37.19	37.2	47.73	لوم
شن لومی	13.60	33.23	7.71	38.72	44	48.4	شن لومی
شن	30	36.9	22.69	41.13	93.7	64.16	شن
رس شنی	5.9	57	5.22	72.3	14.3	64	رس شنی
لوم رسی شنی	12.1	33.3	6.8	36.66	38.3	46.8	لوم رسی شنی
لوم شنی	12.2	33.15	6.85	37.58	40.5	46.25	لوم شنی
سیلت	12.2	33	7.03	38.33	26.9	48.85	سیلت
رس سیلتی	11.3	33	6.78	36.38	33.6	45	رس سیلتی
لوم رسی سیلتی	11.3	32.5	6.78	37.13	33.2	45.26	لوم رسی سیلتی
لوم سیلتی	12.2	33.07	6.98	38.18	37.3	49.06	لوم سیلتی

جدول ۸- مقایسه عمق و عرض پیاز رطوبتی حاصل از هایدروس با ابعاد بیضی رسم شده از محاسبات گشتاورها با دبی کاربردی شش لیتر بر ساعت (بر حسب سانتی‌متر)

Table 8- Comparison of the depth and width of the moisture bulb obtained from hydrous with the dimensions of the oval drawn from the Moment calculations with an applied flow rate of six L hr<sup>-1</sup> (in cm)

بافت	نتایج حاصل از هایدروس در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از گشتاور در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از هایدروس در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از گشتاور در ساعت انتهایی	
	عمق نفوذ	عرض نفوذ	عمق بیضی	عرض بیضی	عمق نفوذ	عرض نفوذ	عمق بیضی	عرض بیضی
رس	10	40	6.67	48.84	23	46	21.83	51.49
لوم رسی	11.05	36.81	6.79	42.79	29.6	45.15	28.25	51.56
لوم	11.97	36.9	6.9	42.56	32.8	48	30.79	52.3
شن لومی	14.55	37.27	8.74	43.92	37	48.3	34.79	52.59
شن	27.8	40	23.99	47.83	74.6	57.4	71.51	60
رس شنی	5.67	65.72	5.57	73.46	12.1	69.8	7.45	86.11
لوم رسی شنی	11.5	37	6.75	39.2	31	45.5	29.44	52.48
لوم شنی	12.8	37.7	7.06	42.67	34.3	47.1	32	51.4
سیلت	12.5	37.25	7.64	43.43	31.7	48.54	36.29	55.94
رس سیلتی	11.3	37	6.77	43.9	28.4	45.5	26.13	49.99
لوم رسی سیلتی	11.5	37.2	6.75	46.28	28.5	45.5	28.5	51.78
لوم سیلتی	12.5	37.6	7.46	43.33	32.5	48.7	29.91	52.48

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۸، با دبی شش لیتر بر ساعت در محاسبه عمق نفوذ در ساعت انتهایی بیش‌ترین میزان خطا مربوط به خاک با بافت رس شنی و کم‌ترین خطا مربوط به خاک با بافت لوم رسی سیلتی با خطای صفر درصد است. نتایج حاصل برای مقایسه عمق و عرض پیاز رطوبتی حاصل از هایدروس و ابعاد بیضی رسم شده در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹- مقایسه عمق و عرض پیاز رطوبتی حاصل از هایدروس با ابعاد بیضی رسم شده از محاسبات گشتاورها با دبی کاربردی هشت لیتر بر ساعت (بر حسب سانتی‌متر)

Table 9- Comparison of the depth and width of the moisture bulb obtained from hydrous with the dimensions of the ellipse drawn from the Moment calculations with an applied flow rate of eight L hr<sup>-1</sup> (in cm)

بافت	نتایج حاصل از هایدروس در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از گشتاور در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از هایدروس در ساعت ابتدایی		نتایج حاصل از گشتاور در ساعت انتهایی	
	عمق نفوذ	عرض نفوذ	عمق بیضی	عرض بیضی	عمق نفوذ	عرض نفوذ	عمق بیضی	عرض بیضی
رس	10.5	44.15	6.63	54.06	19.5	50	17.56	55.64
لوم رسی	11.17	40.9	6.73	48.85	13	45.8	21.49	53.48
لوم	11.86	40.62	6.81	49.85	85	48.1	23.47	55.31
شن لومی	13.55	41.2	8.14	52.09	30	48.6	28.07	55.83
شن	27	43.6	22.92	56.75	60	55.5	56.54	63.29
رس شنی	6	73.44	5.83	84.08	11.1	77	7.41	96.92
لوم رسی شنی	11.7	41.6	6.78	49	16.5	48.1	23.79	54.98
لوم شنی	12.2	31.35	6.88	50.42	27	48.4	24.85	55.02
سیلت	11.75	41.2	7.18	51.6	36	48.65	22.9	55.9
رس سیلتی	11.5	41	5.72	49.41	22	46.3	20.33	53.02
لوم رسی سیلتی	11	40.86	6.7	51.9	22.4	46.3	22.15	55
لوم سیلتی	11.9	41.3	7.11	51.36	26.23	48.6	23.28	56.04

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول‌های فوق، با مقایسه مقادیر عرض و عمق حاصل از مدل هایدروس و بیضی رسم شده می‌توان نتیجه گرفت که هر دو روش در دبی هشت لیتر بر ساعت نتایج تقریباً نزدیک به هم ارائه کرده و براساس نتایج حاصل از مطالعه پژوهش‌گران قبلی می‌توان با کاربرد گشتاورها تحت آبیاری قطره‌ای نحوه‌ی 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 هایدروس بوده و لذا، امکان استفاده از این قابلیت برای پیش‌بینی الگوی رطوبت

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۹، با مقایسه مقادیر عرض و عمق حاصل از مدل هایدروس و بیضی رسم شده می‌توان نتیجه گرفت که هر دو روش در دبی هشت لیتر بر ساعت نتایج تقریباً نزدیک به هم ارائه کرده به این صورت که در ساعت ابتدایی در مورد عمق نفوذ کم‌ترین میزان خطا مربوط به خاک با بافت رس شنی با خطای ۱۷ میلی‌متر است و در ساعت انتهایی مربوط به خاک با بافت لوم رسی سیلتی با اختلاف ۲۵ میلی‌متر است. در مورد عرض پیاز رطوبتی مقادیر پیش‌بینی شده نتایج حاصل از دو مدل اختلاف زیادی با یکدیگر داشته و حاکی از آن است که در دبی هشت لیتر بر ساعت عرض پیاز رطوبتی به‌خوبی برآورد نشده است.

### دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسؤل در اختیار قرار خواهد گرفت.

### مشارکت نویسندگان

**علی نوری:** انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **علی اشرف صدرالدینی:** راهنمایی، مفهوم‌سازی، کنترل نتایج، ویرایش و بازبینی مقاله؛ **سعید صمدیان فرد:** انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، ویرایش و بازبینی مقاله، راهنمایی؛ **فاطمه میکائیلی:** انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله.

### منابع

- اطمینان، سمانه، جلالی، وحیدرضا، محمودآبادی، مجید، خاشعی سیوکی، عباس، و پوررضا بیلندی، محسن (۱۴۰۲). ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی مدل HYDRUS با استفاده از روش DREAM. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۱-۱۵. doi:10.22098/mmws.2022.11659.1152
- جهان‌تیغ، منصور (۱۴۰۰). اثرات روش‌های آبیاری زیرسطحی، سفالی و قطره‌ای بر رشد نهال توت در مناطق خشک (مطالعه موردی: منطقه سیستان). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۲)، ۲۵-۳۵. doi:10.22098/mmws.2021.8691
- رئوف، مجید، اکبری باصری، زینب، رسول‌زاده، علی و عزیزی مبصر، جوانشیر (۱۴۰۱). تحلیل حساسیت نرم افزار Hydrus نسبت به داده‌های ورودی در شبیه‌سازی حرکت آب و جذب ریشه گیاه مرجع چمن. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۹۴-۱۰۷. doi:10.22098/mmws.2022.10847.1090
- صمدیان فرد، سعید (۱۳۸۸). شبیه‌سازی عددی و تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تبریز.
- قربانی، امیر (۱۳۹۲). ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی الگوی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای با منبع نقطه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تبریز.
- کاظمی، هانیه (۱۳۹۰). بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تبریز.
- مسلمی، سمیرا، ناظمی، امیر حسین، صدرالدینی، علی اشرف، صمدیان فرد، سعید، و میکائیلی، فاطمه (۱۴۰۱). توزیع آب در خاک تحت آبیاری قطره‌ای توسط تحلیل گشتاور با کاربرد دی‌های مختلف. *دانش آب و خاک*، ۳(۳)، ۱۷۹-۱۹۸. doi:10.22034/WS.2022.51372.2472
- نوروزیان، زهرا، صدرالدینی، علی اشرف، ناظمی، امیرحسین و دلیر حسن نیا، رضا (۱۳۹۵). بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک‌های لایه‌ای مسطح و شیب‌دار. *دانش آب و خاک*، ۲(۲)، ۱۳-۲۷.

حاصل از یک دبی معین با کاربرد حجم آب مشخص امکان‌پذیر است. با توجه به نتایج حاصله در این پژوهش، می‌توان به ازای هر میزان دبی و نوع بافت خاک، مقادیر نظیر  $M_{00}$  و نیز مقادیر گشتاورهای  $\sigma_x$ ،  $\sigma_z$  را تعیین نمود. مقادیر مذکور قابلیت کاربرد در روش‌های یادگیری ماشین را دارند که خود مزیتی برای روش گشتاورها است. لازم به ذکر است که مطالعات پیشین در این زمینه فقط محدود به چند نوع بافت خاک بود که در پژوهش حاضر تلاش شد که در تمامی ۱۲ نوع بافت خاک، قابلیت مدل گشتاورها ارزیابی شود. نتایج حاصله توانایی بالای مدل گشتاورها در خصوص مدل‌سازی توزیع میزان رطوبت و نحوه گسترش آن در خاک را تأیید نمود که این نتایج می‌تواند توسط سایر پژوهش‌گران در انواع خاک‌ها با دقت قابل‌قبولی به کار گرفته شود.

### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش انجام شده، به‌منظور بررسی دقت روش تحلیلی محاسبه گشتاور، جهت پیش‌بینی توزیع پیاز رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای، ابتدا شبیه‌سازی رفتار زیرسطحی رطوبت به کمک مدل هایدروس انجام شد. این آزمایش در ۱۲ نوع بافت خاک تعریف شده در نرم‌افزار رزتا که در نرم‌افزار هایدروس گنجانده شده، با دبی‌های کاربردی دو، چهار، شش و هشت لیتر بر ساعت انجام شد و نتایج حاصل در بازه‌های یک ساعته ثبت شده و داده‌های هایدروس جهت استفاده در روش گشتاور مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل بیان داشت که با کمک روش تحلیل گشتاور می‌توان موقعیت مرکز جرم آب توزیع شده در خاک، تغییرات جبهه رطوبتی نسبت به محور X و Z به‌دست آورد. با بررسی و مقایسه ابعاد جبهه رطوبتی حاصل از هایدروس و بیضی‌ها، مشاهده شد که انطباق مناسبی بین دو روش وجود دارد. از این‌رو، می‌توان به نتایج حاصل از روش تحلیلی گشتاور به جهت بررسی ابعاد پیاز رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای اتکا کرد و مدت زمان انجام آزمایش‌ها و پژوهش‌های میدانی را به‌صورت بهینه و در کم‌ترین زمان به انجام رساند.

### سیاسگزار

بدین‌وسیله از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه تبریز که باعث افزایش کیفیت پژوهش حاضر شد، سیاسگزاری می‌شود.

### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

### References

- Autovino, D., Rallo, G., & Provenzano, G. (2018). Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under different irrigation systems with Hydrus-2D: Model performance

- and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, 203, 225-235. doi: 10.1016/j.agwat.2018.03.015
- Carsel, R.F., & Parrish, R.S. (1988). Developing joint probability distributions of soil

- watervretention characteristics, *Water Resource Research*, 24, 755- 769.
- Ghorbani, A. (2013). Evaluation of prediction models of soil moisture distribution pattern in drip irrigation with point source. Master's Thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran. [In Persian]
- Etminan, S., Jalali, V.R., Mamodabadi, M., Khashei-Siuki, A., & Pourreza-Bilondi, M. (2023). Assessing the hydraulic parameter's uncertainty of the HYDRUS model using DREAM method. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(4), 1-15. doi:10.22098/mmws.2022.11659.1152. [In Persian]
- Hinnell, A.C., Lazarovitch, N., & Furman, A. (2010). Neuro-drip: estimation of subsurface wetting patterns for drip irrigation using neural networks. *Irrigation Science*, 28, 535-544. doi:10.1007/s00271-010-0214-8
- Jahantigh, M. (2021). Effects of irrigation methods of subsurface, clay pot and drop on Mulberry growth in dry land region (Case study: Sistan area). *Water and Soil Management and Modeling*, 1(2), 25-35. doi:10.22098/mmws.2021.8691. [In Persian]
- Karimi, B., Karimi, N., Shiri, J., & 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. doi: 10.21203/rs.3.rs-267556/v1
- Kazemi, H. (2011). Experimental and numerical investigation of soil moisture distribution in surface and subsurface drip irrigation. Master's Thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran. [In Persian]
- Kazemi, H., Sadraddini, A.A., Nazemi, A.H., & Sanchez, C. (2021). A moment analysis for modeling soil water distribution in furrow irrigation: variable vs. constant ponding depths. *Water*, 13, 1415. doi:10.3390/w13101415
- Kisi, O., Khosravinia, P., Heddami, S., Karimi, B., & 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. doi: 10.1016/j.agwat.2021.107067
- Kumar Vishwakarma, D., Kumar, R., Tomar, A.S., & Kuriqi, A. (2023). Eco-hydrological modeling of soil wetting pattern dimensions under drip irrigation systems. *Helion*, 9(7), e18078. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18078
- Lazarovitch, N., Warrick, A.W., Furman, A., & Simunek, J. (2007). Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *Vadose Zone Journal*, 6, 116-123. doi:10.2136/vzj2006.0052
- Lazarovitch, N., Warrick, A.W., Furman, A., & Zerihun, D. (2009). Subsurface water distribution from furrows described by moment analyses. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135, 7-12. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1
- Li, J., Zhang, J., & Ren, L. (2003). Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. *Irrigation Science*, 22, 19-30. doi: 10.1007/s00271-003-0064-8
- Moslemi, S., Nazemi, A.H., Sadraddini, A.A., Samadianfard, S., & Mikaeili, F. (2021). Distribution of water in soil under drip irrigation by moment analysis using different discharges. *Water and Soil Science*, 34(3), 179-198. doi:10.22034/WS.2022.51372.2472. [In Persian]
- Norouzian, Z., Sadraddini, A.A., Nazemi, A.H., & Delirhasannia, R. (2017). Experimental and numerical investigations of soil water distribution under subsurface drip irrigation in level and sloping layered soils. *Water and Soil Science*, 26(4), 13-27. [In Persian]
- Radcliffe, D., & Simunek, J. (2010). Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications; CRC Press, Taylor and Francis Group: Boca Raton, FL, USA p: 388. doi:10.1201/9781315275666
- Raouf, M., Akbari Baseri, Z., Rasoulzadeh, A., & Azizi Mobaser, J. (2022). Sensitivity analysis of Hydrus software to input data in simulating water movement and root uptake of grass as reference plant. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(3), 94-107. doi:10.22098/mmws.2022.10847.1090. [In Persian]
- Samadianfard, S. (2009). Numerical and analytical simulation of wetting front advancing in drip irrigation. Master's Thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran. [In Persian]
- Shiri, J., Karimi, B., Karimi, N., Kazemi, M.H., & Karimi, S. (2020). Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *Journal of Hydrology*, 585, 124792. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124792
- Siyal, A.A., & Skaggs, T.H. (2009). Measured and clay pipe subsurface irrigation, *Agric. Agricultural Water Management*, 96, 893-904. doi: 10.1016/j.agwat.2008.11.013
- Yeh, T.C.J., Ye, M., & 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
- Zhenjie, Q., Jiusheng, L., & 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. doi:10.1007/s00271-017-0553-9.