

اتصال معادله های ناویر استوکس و ریچاردز برای شبیه سازی عددی جریان دوفاز سطحی و زیر سطحی در آبیاری قطره ای سطحی

یاسر یکانی مطلق^{۱*}، علی اشرف صدرالدینی^۲، امیر حسین ناظمی^۳ و حسین رضایی^۴

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز. yaser.yekani@tabrizu.ac.ir

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۲۱

چکیده

دانستن حرکت آب در حجم مرطوب شده خاک در اطراف قطره چکان، پیش شرطی برای طراحی سیستم های آبیاری و مدیریت دوگانه آب و مواد شیمیایی می باشد. در حقیقت برای نوع خاک مشخص، دانستن تکامل و سیر تدریجی تغییر شکل حجم مرطوب شده، می تواند در تعیین فاصله قطره چکان ها و مدت زمان آبیاری مفید واقع شود. اکثر مدل های عددی و تحلیلی پیش بینی جبهه رطوبتی برای حل نیازمند تعیین سطح تغذیه اشباع خاک از نتایج آزمایشگاهی می باشند که به دست آوردن دقیق آن نیازمند صرف زمان و هزینه است. همچنین این مدل ها در صورتی که شدت جریان قطره چکان ها بیشتر از نفوذ پذیری خاک باشد نتایج قابل اعتمادی را نمی دهند. در این تحقیق مدل جدید اتصال معادله های سطحی دو فاز (معادلات ناویر استوکس و مدل حجم سیال) و زیر سطحی (ریچاردز) برای شبیه سازی جریان سطحی آب-هوا و جبهه رطوبتی داخل خاک در آبیاری قطره ای سطحی ارائه شده است. برای این منظور ابتدا معادله ریچاردز با روش حجم محدود گسسته سازی شد و با معادله های ناویر استوکس دو فاز بر اساس الگوریتم ارائه شده در این تحقیق جفت گردید. برای صحت سنجی مدل، نتایج شبیه سازی در دو بافت خاک و در دبی های مختلف با نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی شده با نرم افزارهای پروس بر اساس سه شاخص آماری درصد خطای نسبی، مجذور میانگین مربعات خطا و کارایی مدل مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده دارای توانایی بسیار بالایی در شبیه سازی جبهه رطوبتی داشته و از دقت بیشتری نسبت به نرم افزار های پروس برخوردار است.

کلید واژه ها: آبیاری قطره ای، جبهه رطوبتی، معادله های ناویر استوکس، معادله ریچاردز، جفت کردن معادله ها.

Coupling of Navier-Stokes and Richards Equations for Numerical Simulation of Two Phase Surface and Subsurface Flow in Surface Drip Irrigation

Y. Yekani Motlagh^{1*}, A.A. Sadraddini², A.H. Nazemi³ and H. Rezaie⁴

1* - Corresponding Author, Ph. D Student Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, University of Tabriz.

2,- Professor, Department of Water Engineering, University of Tabriz.

3- Professor, Department of Water Engineering, University of Tabriz.

4- Associate professor, Department of Water Engineering, University of Urmia,

Received: 13 October 2015

Accepted: 20 January 2016

Abstract

Water dynamic in wetted volume of soil around emitter is one of the primary information for designing the irrigation systems and management of water and chemical substances. In fact, for particular kind of soil, knowing the evolution and gradual change of the shape of the wetted volume is necessary for estimation of the distance of emitters from each other and irrigation duration. Most of the numerical and analytical models used for prediction of wetting pattern need determining the ponding area from high cost experimental tests. These models predict unreliable

results if the discharge of emitter is more than infiltration of soil. In this paper, a new model for coupling surface (Navier-Stokes, VOF) and subsurface flow equations (Richards) is presented. The method can use for simulation of both two phase air-water surface flow along with wetting pattern inside the soil in surface drip irrigation. In this model, Richards equation is discretized with finite volume method and coupled with two phases Navier-Stokes equations based on the new coupling algorithm. To demonstrate the accuracy of the model the results of new method for two different soil texture and discharge are compared with experimental data and numerical results of HYDRUS software. Furthermore, statistical indexes such as mean error and root mean square error and model efficiency are evaluated for the model. The results indicated that the presented model has the high ability in simulation of wetted pattern, and its accuracy is more than HYDRUS software.

Keywords: Drip irrigation, Wetting pattern, Navier- Stocks equations, Richards equation, Equations coupling

چوهان^{۱۱}، ۲۰۰۸؛ کیوان و پیتر^{۱۲}، ۲۰۱۱؛ دابرال و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۲؛ ژینگانگ لی و همکاران^{۱۴}، ۲۰۱۵ را می توان نام برد. مدل عددی هایدروس یک بسته نرم افزاری کامپیوتری برای شبیه سازی حرکت آب حرارت و نمک در حالت غیر اشباع در خاک می باشد که توسط سایمونک و همکاران^{۱۵} (۱۹۹۹) ارائه شده است. در این نرم افزار معادله ریچاردز برای حرکت آب در حالت غیر اشباع به صورت عددی حل شده است. محققین متعددی با استفاده از این ابزار به بررسی توانایی این مدل در پیش بینی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره ایی سطحی و زیر سطحی پرداخته اند، از جمله (اسکگز و همکاران^{۱۶}، ۲۰۰۴؛ کوک و همکاران^{۱۷}، ۲۰۰۶؛ پروونزانو^{۱۸}، ۲۰۰۷؛ کاندلوس و سیمونک^{۱۹}، ۲۰۱۰؛ بوفون و همکاران^{۲۰}، ۲۰۱۲؛ بوسجان و همکاران^{۲۱}، ۲۰۱۴) نتایج این تحقیقات نشان می دهد، که مدل عددی هایدروس دارای دقت کافی در شبیه سازی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره ایی سطحی و زیر سطحی در خاک ها با بافت های متفاوت می باشد.

اکثر مدل های موجود، برای شبیه سازی جریان زیر سطحی بوده و توانایی انطباق با شرایط جریان سطحی (شرایط مرزی متغیر با زمان) را ندارند. همچنین در اکثر مدل های تحلیلی و عددی از جمله هایدروس برای شبیه سازی جریان آب تحت منبع نقطه ایی می باید سطح تغذیه ایی اشباع به وجود آمده در سطح خاک به عنوان ورودی به این مدل ها، در نظر گرفته شود. که ابعاد این سطح معمولاً از طریق آزمایش و یا با سعی و خطا تعیین می شود. به علاوه این مدل ها در حالتی که میزان شدت جریان قطره چکان بیشتر از نفوذپذیری

مقدمه

نگاهی به تاریخ آب و آبیاری در جهان نشان می دهد که در سال های اخیر روش های متعددی در زمینه آبیاری کشاورزی ابداع شده است. کمبود آب، وضعیت نامناسب آب و هوا، پستی و بلندی زمین، کیفیت نامطلوب آب و عدم دسترسی به نیروی کارگر از جمله عواملی هستند که در پیدایش این روش ها موثر بوده اند. از روش های جدید آبیاری که به سرعت در کشورهای مختلف رو به گسترش است، روش آبیاری قطره ای است. دانستن نحوه حرکت آب در حجم مرطوب شده خاک در اطراف قطره چکان، پیش شرطی برای طراحی سیستم های آبیاری قطره ای و مدیریت دوگانه آب و مواد شیمیایی می باشد. توزیع رطوبت و شکل پیاز رطوبتی خاک در آبیاری قطره ایی به پارامترهای مختلفی از جمله مشخصات هیدرولیکی خاک، دبی قطره چکان، توزیع پیوسته و متناوب آب، تبخیر و تعرق و معماری شکل ریشه بستگی دارد (لازاروویچ و همکاران^۱، ۲۰۰۹). روش های تجربی، تحلیلی و عددی متعددی برای تشریح پدیده نفوذ آب از منبع نقطه ای وجود دارند که برآورد الگوی خیس شدگی از مشخصات هیدرولیکی را ممکن می سازند. از جمله محققینی که تحقیقاتی در این زمینه انجام داده اند شامل (فیلیپ^۲، ۱۹۷۱؛ بن آشر و همکاران^۳، ۱۹۷۸؛ لوین و همکاران^۴، ۱۹۷۹؛ فیلیپ، ۱۹۸۴؛ بن آشر، ۱۹۸۶؛ لافولیه و همکاران^۵، ۱۹۸۹؛ آنجالاکیس و همکاران^۶، ۱۹۹۳؛ القینا و ابوعواد^۷، ۲۰۰۱؛ توربورن و همکاران^۸، ۲۰۰۳؛ المالوگلو و مالموس^۹، ۲۰۰۶؛ چن و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۶؛ لازاروویچ و همکاران، ۲۰۰۷؛ باتناگرو و

11 - Bhatnagar and Chauhan.
12 - Keyyan. and Peters.
13 - Dabral *et al.*
14 - Zhigang L *et al.*
15 - Simunek *et al.*
16 - Skaggs *et al.*
17 - Cook *et al.*
18 - Provenzano
19 - Kandelous and Simunek.
20 - Bufon *et al.*
21 - Boštjan *et al.*

1 -Lazarovitch *et al.*
2 - Philip
3 - Ben-Asher *et al.*
4 -Levin *et al.*
5 - Lafolie *et al.*
6 - Angelakis *et al.*
7 - Al-Qinna, and Abu-Awwad.
8 - Thorburn *et al.*
9 - Elmaloglou and Malamos.
10 - Chen *et al.*

رطوبتی را شبیه سازی کند، ارائه نشده است. لذا در مدل عددی پیشنهادی برای اولین بار با جفت کردن معادله ها ناوبر استوکس دو فاز برای جریان سطحی و معادلات ریچاردز برای جریان زیرسطحی مدل عددی ارائه شده است که مستقل از نتایج میدانی برای سطح اشباع، خود سطح اشباع را به دست آورده و جبهه رطوبتی را پیش بینی می نماید. با ارائه این مدل، می توان جبهه رطوبتی سطحی و زیر سطحی را در بافت ها مختلف خاک و دبی های مختلف قطره چکان با دقت بیشتر و بدون نیاز به انجام آزمایش های میدانی پیش بینی نمود.

روش تحقیق

معادله های حاکم بر جریان سطحی و زیرسطحی و روش اتصال معادله ها

معادله های حاکم بر جریان سطحی

معادله های حاکم بر جریان سطحی دوفاز آب-هوا به ترتیب معادله های پیوستگی معادله (۱) و ناوبراستوکس معادله (۲) می باشد (هیرت و همکاران^۸، ۱۹۹۰).

$$\nabla \cdot \rho_m \vec{V}_m = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} \vec{V}_m + \vec{V}_m \cdot \nabla \vec{V}_m = -\nabla P + \mu_m \nabla^2 \vec{V}_m \quad (2)$$

در این روابط، μ_m لزجت دینامیکی، ρ_m دانسیته، \vec{V}_m سرعت جریان و P فشار جریان دوفاز (آب-هوا) سطحی می باشد. با توجه به اینکه جریان سطحی شامل دو فاز آب و هوا می باشد در این تحقیق از مدل حجم سیال برای شبیه سازی جریان دو فاز استفاده شده است. در این روش متغیری معرفی می شود که کسر حجمی سیال هوا در هر سلول می باشد. کسر حجمی هوا، نسبت حجم هوا به حجم کل سلول است. مقدار کسر حجمی هوا در هر سلول از حل معادله (۳) به دست می آید.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{V}_m \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (3)$$

پس از تعیین مقدار کسر حجمی هوا در هر سلول از رابطه (۳) مقدار چگالی و ویسکوزیته از رابطه (۴) و (۵) به دست می آید.

$$\rho_m = \alpha \rho_a + (1 - \alpha) \rho_l \quad (4)$$

$$\mu_m = \alpha \mu_a + (1 - \alpha) \mu_l \quad (5)$$

پس یکی از سه حالت زیر اتفاق می افتد:

$\alpha = 0$ سلول خالی از سیال هوا و پر از سیال آب است.

خاک است توانایی مدل سازی صحیح را ندارند (سابایا^۱، ۲۰۱۳). بنابراین ارائه مدلی که بتواند سطح تغذیه را در گام های زمانی مختلف شبیه سازی کرده و قابلیت انطباق با شرایط جریان زیر سطحی را داشته باشد، اجتناب ناپذیر می باشد. یکی از راه کار های حل این مشکل اتصال معادله ها جریان های سطحی و زیر سطحی می باشد. تا کنون تعدادی از محققین برای شبیه سازی جریان های سطحی و زیر سطحی در آبیاری سطحی و مطالعات هیدرولوژیکی از اتصال معادله ها استفاده نموده اند، به طوری که موریتا و یان^۲ (۲۰۰۲) یک مدل جفت شده دو بعدی جریان سطحی و سه بعدی جریان زیرسطحی را برای شبیه سازی روند بارش-رواناب با استفاده از معادله ها سنت ونانت و ریچاردز ارائه کرده است. پندی و هوپاکورن^۳ (۲۰۰۴) یک مدل سه بعدی ارتباط بین جریان های سطحی و زیر سطحی را برای کاربرد در رودخانه ها، دریاچه ها، تالاب ها و کانال ها ارائه نمودند. آنها برای شبیه سازی جریان سطحی از معادله دو بعدی موج انتشار پخش و برای شبیه سازی جریان زیر سطحی از معادله سه بعدی ریچاردز استفاده نمودند. زریهون و همکاران^۴ (b, a - ۲۰۰۵) یک مدل عددی اتصال جریان سطحی و زیر سطحی با قابلیت جفت شدن این معادله ها به معادله انتقال املاح در خاک در آبیاری کرتی و نواری ارائه کرده اند. وهلینگ و همکاران^۵ (b, a - ۲۰۰۷) یک مدل عددی اتصال معادله ها جریان سطحی و زیر سطحی در آبیاری شیاری ارائه کرده اند، که در این مدل، معادله های جذب رطوبت توسط ریشه نیز به معادله ریچاردز برای شبیه سازی دقیق جبهه رطوبتی زمانی که جذب رطوبت توسط ریشه صورت می گیرد اضافه گردیده است. کونگ و همکاران^۶ (۲۰۱۰) یک مدل جدید اتصال معادله های جریان سطحی و زیر سطحی را برای شبیه سازی در مناطق ساحلی ارائه دادند. بدین صورت که برای شبیه سازی جریان سطحی از معادله های سنت ونانت و برای شبیه سازی جریان های زیر سطحی از معادلات دوپوئی و فورشایمر استفاده نمودند. کوهنی و همکاران^۷ (۲۰۱۱) برای کاربردهای زیست محیطی و کشاورزی یک مدل اتصال جریان سطحی و زیر سطحی ارائه کرده اند، که برای شبیه سازی جریان سطحی از مدل یک بعدی موج کینماتیکی و برای جریان زیر سطحی از مدل دو بعدی ریچاردز استفاده نموده است.

در آبیاری قطره ای برای پیش بینی جبهه رطوبتی توسط مدل های عددی و نرم افزار های تجاری از جمله هایدروس، سطح تغذیه اشباع به وجود آمده در سطح خاک به عنوان ورودی به نرم افزار داده می شود. که مقادیر این سطح معمولاً از طریق آزمایش یا باسعی و خطا به دست می آید و وارد نرم افزار می شود. تا کنون نرم افزاری که بدون نیاز به نتایج میدانی مربوط به سطح تغذیه اشباع بتواند نیاز

- 1 - Subbaiah.
- 2 - Morita and Yen.
- 3 - Panday Huyakorn.
- 4 - Zerihun et al.
- 5 - Wohling et al.
- 6 - Kong et al.
- 7 - Kohne et al.

حل معادله ناویر استوکس و مدل جریان دو فازی سطح مشترک بین آب و هوا مشخص می شود و فشار و میدان سرعت فاز آب و هوا بدست می آید. در مرحله بعدی معادله های جریان زیر سطحی حل خواهد گردید که شرط مرزی h برای حل معادله ریچاردز از فشار حاصل از حل معادله ناویر استوکس در گام زمانی حاضر بدست می آید و این فرآیند تا رسیدن به جواب نهایی ادامه پیدا خواهد کرد.

در این تحقیق کد عددی OpenFOAM بر اساس فلوچارت شکل (۱) به منظور حل معادله های جریان سطحی و زیر سطحی توسعه داده شده است، OpenFOAM یک کد عددی متن باز دینامیک سیالات محاسباتی با قابلیت های بسیار بالا می باشد که بر اساس روش حجم محدود و به زبان ++C شی گرا نوشته شده و قابل اعمال بر روی هر شبکه محاسباتی سه بعدی با شکل دلخواه است. کد بر اساس محاسبات تانسوری مکانیک محیط پیوسته بنا شده است. این کد توسط هنری ویلر و تیمش و نیز پروفیسور جاسک از دانشگاه زاگرب بنا نهاده شده است و پس از آن توسط افراد مختلف توسعه و تکمیل یافت. این کد قابلیت حل معادله های ناویر استوکس را دارد که در این تحقیق این کد عددی توسعه یافته است بدین صورت که ابتدا معادله ریچاردز در زبان برنامه نویسی ++C با روش حجم محدود نوشته شده و بر اساس الگوریتم ارائه شده با معادلات ناویر استوکس جریان دو فاز و روش حجم سیال جفت گردیده است.

معیارهای ارزیابی دقت مدل

برای تحلیل مقادیر شبیه سازی شده با مقادیر واقعی در این تحقیق از چهار معیار آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) ضریب تبیین (R^2)، کارایی مدل (EF) و شاخص خطای نسبی (ME) استفاده شده است. رابطه کارایی مدل (EF) توسط اسمیت و همکاران^۳ (۱۹۹۶) ارائه شده است حداکثر مقدار این پارامتر یک می باشد و هر چه این پارامتر به یک نزدیک باشد نشان دهنده کارایی بالای مدل می باشد. روابط محاسبه میانگین خطای استاندارد، ضریب همبستگی، کارایی مدل و شاخص خطای نسبی به صورت زیر می باشند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i)^2}{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2) (\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2)} \quad (11)$$

$$EF = \frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

$\alpha = 1$ سلول پراز سیال هوا است.

$0 < \alpha_q < 1$ سلول ترکیبی از سیالات هوا و آب است. جایی که مقدار α بین صفر و یک قرار دارد، همان سطح آزاد است. بنابراین، متغیرها و خصوصیات هر کدام از سلولها، یا به یک فاز و یا به ترکیب آن با فازهای دیگر ربط پیدا می کند.

معادله های حاکم بر جریان زیر سطحی آب در محیط متخلخل غیر اشباع

معادله حاکم بر جریان در محیط متخلخل غیر اشباع معادله غیر خطی ریچاردز میباشد (ریچاردز^۱، ۱۹۳۱). ریشه این معادله از ترکیب قانون بقا جرم و قانون داریسی است. شکل کلی معادله ریچاردز به شکل زیر می باشد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [K(h) \cdot \nabla (h+z)] \quad (6)$$

که در آن θ : مقدار رطوبت حجمی [$L^3 L^{-3}$]; h : بار فشار آب خاک [L]; t : زمان [T]; K : هدایت هیدرولیکی [$L T^{-1}$] باشد. روابط مختلفی برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک وجود دارد که در این تحقیق از روابط ترکیب شده ون گنوختن - معلم استفاده شده است (وان گنوختن^۲، ۱۹۸۰):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (7)$$

$$K(h) = K_s \cdot S_c^l \left[1 - \left(1 - S_c^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (8)$$

$$S_c = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (9)$$

که در آن θ_s : مقدار رطوبت در حالت اشباع [$L^3 L^{-3}$]; θ_r : مقدار رطوبت باقیمانده [$L^3 L^{-3}$]; K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع [$L^3 L^{-3}$]; و α , l و n پارامترهای شکل هستند.

اتصال معادله های جریان های سطحی و زیر سطحی

همان طور که عنوان گردید برای شبیه سازی جریان سطحی از معادله های ناویر استوکس و برای جریان زیر سطحی از معادله ریچاردز استفاده خواهد گردید. بدین منظور از جفت نمودن معادله های در این تحقیق استفاده شده است. مطابق فلوچارت شکل (۱) ابتدا معادله های جریان سطحی (معادلات ناویر استوکس) حل می گردد شرط مرزی معادله های ناویر استوکس از بدست آوردن سرعت نفوذ با استفاده از گرادیان پتانسیل روی سطح مشترک خاک و آب حاصل از حل معادله ریچاردز در گام زمان قبلی به دست می آید. از

1-Richards.

2 - Van Genuchten.

باشد. ابعاد قطره چکان نیز به صورت یک استوانه با قطر ۲ میلی متر و ارتفاع ۲ سانتی متر تعیین گردید. همان طور که از شکل (۲) مشخص است مسئله مورد بررسی دارای هندسه متقارن نسبت به محور مرکزی عبوری از قطره چکان (A-A) می باشد لذا فقط بخشی از هندسه که در شکل (۲) نشان داده شده است شبکه بندی شده است و مسئله به صورت متقارن محوری حل گردیده است.

مش مورد استفاده مش مربعی ساختاریافته است که با استفاده از این نوع مش پایداری حل افزایش می یابد. مش در نزدیکی قطره چکان که دارای قطر کوچک ۲ میلی متر می باشد ریز شده است به علاوه در بخش داخل خاک نیز چون در محل برخورد سیال به خاک در بخش پایین قطره چکان انتظار می رود نفوذ سیال بیشتر باشد، مش ریزتر شده است، شکل (۳-الف) استقلال از شبکه برای شرایط مختلف دبی و بافت های مختلف خاک بررسی شده است که نتایج بررسی استقلال حل از شبکه در شرایط بیشترین دبی (۲/۰۵ لیتر بر ساعت) و بیشترین نفوذ (خاک شنی) در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. شکل (۳-ب) خطای نسبی حل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی را در تعداد مش مختلف نشان می دهد. با توجه به نتایج نمودار می توان مشاهده کرد که خطای نسبی حل از تعداد مش ۲۲ هزار به بعد تغییر نمی کند. نتایج حل در سایر دبی ها و بافت ها نیز در این تعداد مش مستقل از شبکه می شوند. لذا این مش به عنوان مش مناسب در حل عددی استفاده شده است.

$$ME = \frac{(Y_i - X_i)}{X_i} \quad (13)$$

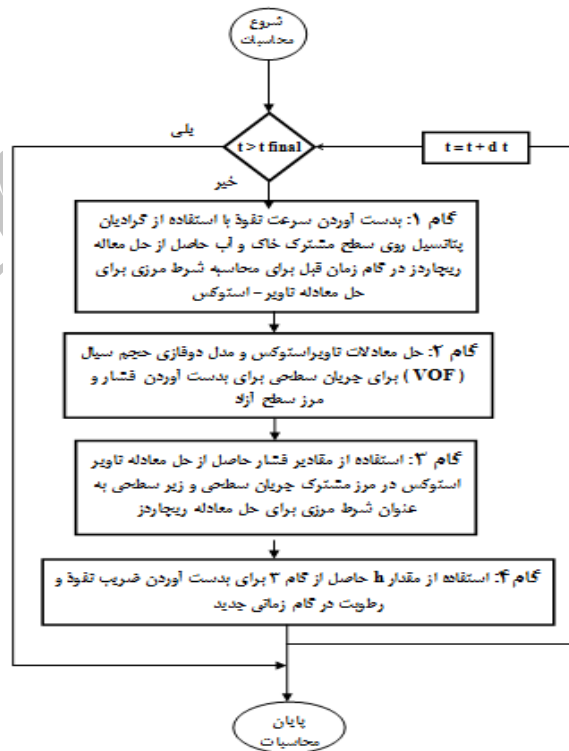
Y_i, X_i : به ترتیب مقادیر فواصل مشاهداتی حاصل از انجام آزمایش و شبیه سازی شده با مدل عددی، \bar{x} : میانگین مقایر مشاهداتی و n : تعداد مشاهدات می باشد.

مشخصه های مدل عددی شبیه سازی شده

برای اعتبار سنجی مدل عددی در این تحقیق از نتایج آزمایشگاهی بوسجان و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده است. آنها در این تحقیق از دو نوع خاک با مشخصات جدول (۱) استفاده نموده اند. بوسجان و همکاران (۲۰۱۴) در مدل آزمایشگاهی از یک قطره چکان که به فاصله ۲ میلی متری بالای سطح خاک بود با دبی های ۰/۱۱، ۰/۴۹، ۰/۹۹، ۱/۵۱ و ۲/۰۵ لیتر در ساعت استفاده نمودند. در این آزمایش ها حجم کل آب وارد شده به خاک از قطره چکان ۲۰ لیتر در نظر گرفته شده بود.

شبکه بندی و شرایط مرزی

در شکل (۲) شماتیک سه بعدی محدوده جریان شبیه سازی شده تحقیق حاضر ارائه شده است. این مدل شامل سه بخش بوده که شامل منطقه جریان سطحی، زیر سطحی و قطره چکان می باشد. میدان حل یک استوانه با شعاع ۶۰ سانتی متری و ارتفاع ۴۸/۲ سانتی متری در نظر گرفته شد که ارتفاع بخش جریان سطحی ۲ میلی متر (فاصله نقطه خروج آب از قطره چکان تا سطح خاک) می

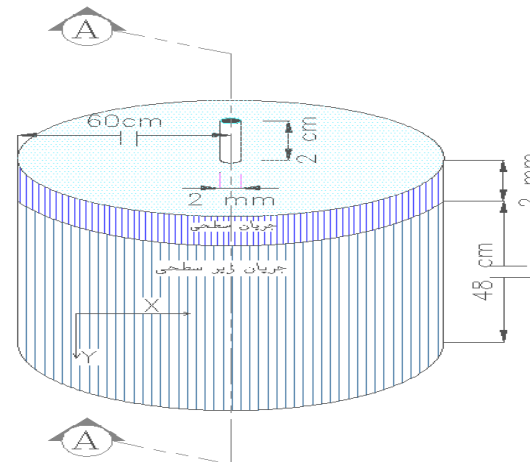


شکل ۱- فلوچارت اتصال معادله های جریان های سطحی و زیر سطحی

یکانی مطلق و همکاران: اتصال معادله های ناویر استوکس و ریچاردز...

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده بوسجان و همکاران (۲۰۱۴)

بافت خاک	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	l ($cm \min^{-1}$)	K_s ($cm \min^{-1}$)	$n(-)$	α (cm^{-1})	θ_r ($cm^3 cm^{-3}$)	θ_s ($cm^3 cm^{-3}$)	خاک
شنی	۰/۱۶	۰/۳۲	۹۹/۵۲	۰/۵	۰/۴۸۱	۳/۴۳۷	۰/۰۲۹	۰/۰۱۸	۰/۴۵۹	شنی
لوم رسی سیلتی	۳۴/۹۶	۴۶/۷۷	۱۸/۲۷	۰/۵	۰/۰۰۷	۱/۲۸۱	۰/۰۲۱۵	۰/۱۳	۰/۵۲	سیلتی



شکل ۲- شماتیک مدل سه بعدی شبیه سازی شده

$$\theta_p^{t+\Delta t, m+1} = \theta_p^{t+\Delta t, m} + \left(\frac{d\theta}{dh}\right)^{t+\Delta t, m} (h_p^{t+\Delta t, m+1} - h_p^{t+\Delta t, m}) \quad (16)$$

با جای گذاری این معادله در معادله (۱۵) شکل کلی معادله خطی حاصل به صورت زیر است:

$$\alpha h_N^{t+\Delta t, m+1} + \beta h_s^{t+\Delta t, m+1} + \gamma h_w^{t+\Delta t, m+1} + \rho h_E^{t+\Delta t, m+1} + \lambda h_p^{t+\Delta t, m+1} = \varepsilon \quad (17)$$

$$\alpha = k_n^t \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad \beta = k_s^t \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad \gamma = k_w^t \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad \rho = k_e^t \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (18)$$

$$\lambda = - \left[(k_n^t + k_s^t + k_w^t + k_e^t) \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + C_p^t \right] \quad (19)$$

$$\varepsilon = \theta_p^{t+\Delta t, m} - \theta_p^{t, m} - C_p^t h_p^{t+\Delta t, m} + (k_s^t - k_n^t) \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) \quad (20)$$

با اعمال شرایط مرزی برای مرز سمت راست در معادله (۱۷) ضریب: $\rho=0$ خواهد گردید

$$\alpha h_N^{t+\Delta t, m+1} + \beta h_s^{t+\Delta t, m+1} + \gamma h_w^{t+\Delta t, m+1} + \lambda h_p^{t+\Delta t, m+1} = \varepsilon \quad (21)$$

$$\lambda = - \left[(k_n^t + k_s^t + k_w^t) \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) + C_p^t \right] \quad (22)$$

$$\varepsilon = \theta_p^{t+\Delta t, m} - \theta_p^{t, m} - C_p^t h_p^{t+\Delta t, m} + (k_s^t - k_n^t) \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) \quad (23)$$

در نقاط مرزی پایین با اعمال شرایط مرزی در معادله (۱۷) ضریب $\beta = 0$ خواهد گردید. در نتیجه معادله های به فرم زیر در خواهد آمد:

$$\alpha h_N^{t+\Delta t, m+1} + \gamma h_w^{t+\Delta t, m+1} + \rho h_E^{t+\Delta t, m+1} + \lambda h_p^{t+\Delta t, m+1} = \varepsilon \quad (24)$$

شرایط مرزی در این تحقیق مطابق شکل (۳-ج) بدین صورت تعیین گردید که محل ریزش آب از قطره چکان به عنوان شرط مرزی سرعت ورودی تعیین گردید و سرعت با توجه به سطح مقطع قطره چکان و در دبی های مختلف محاسبه گردید. دیواره قطره چکان نیز به عنوان شرط مرزی دیوار در نظر گرفته شد و سایر مرز های جریانی سطحی به عنوان شرط مرزی فشار اتمسفر تعیین گردید. شرط مرزی جریانی مشترک سطحی و زیر سطحی نیز به صورت شرط مرزی متغیر با زمان و از حل معادلات جفت شده جریانی سطحی و زیر سطحی مطابق با توضیحات بخش قبلی به دست می آید. برای جریانی زیر سطحی و در قسمت های تحتانی و کناره ها شرط مرزی زهکش آزاد ($\nabla H = 0$) در نظر گرفته شد.

حل عددی

در این بخش نحوه گسسته سازی معادله های بر اساس شرایط مرزی و به روش حجم محدود ارائه شده است. معادله (۱۴) حالت کلی گسسته سازی شده معادله ریچاردز برای حجم کنترل V_p بر اساس شکل (۴) را نشان می دهد.

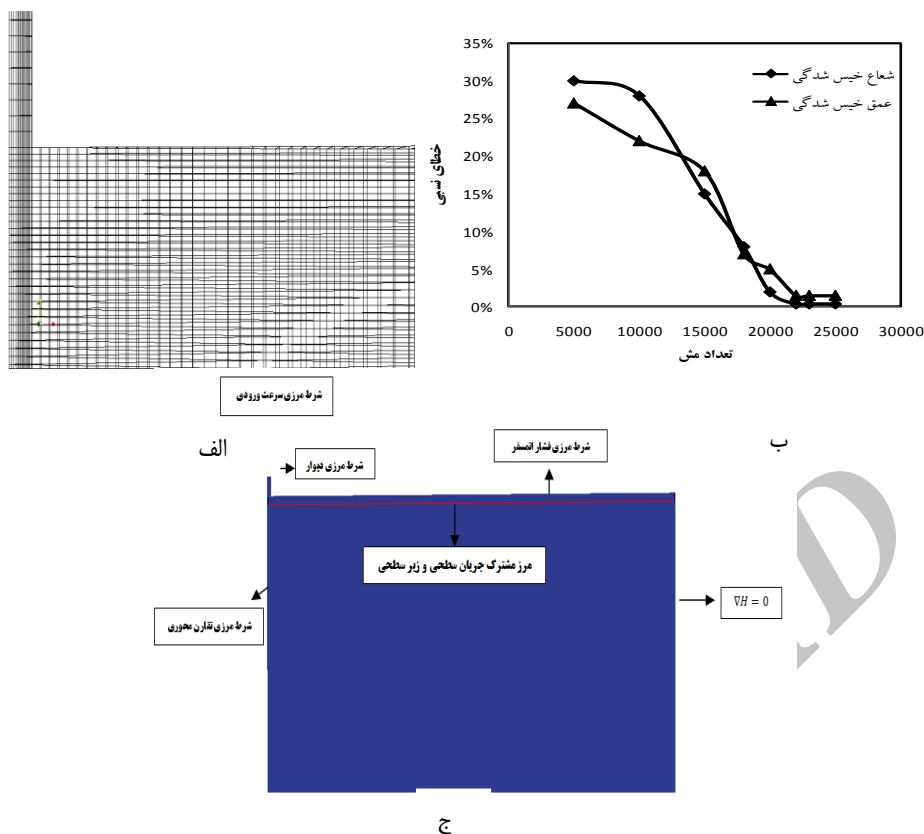
$$\iint_{V_p}^{t+\Delta t} \frac{\partial \theta}{\partial t} dt dv = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) dv dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial y} + k_y \right) dv dt \quad (14)$$

معادله کلی پس از گسسته سازی زمانی و مکانی به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} & (\theta_p^{t+\Delta t, m+1} - \theta_p^t) \Delta z = \\ & \left(k_e^t \frac{h_E^{t+\Delta t, m+1} - h_p^{t+\Delta t, m+1}}{\Delta x} - \right. \\ & \left. k_w^t \frac{h_p^{t+\Delta t, m+1} - h_w^{t+\Delta t, m+1}}{\Delta x} \right) + \\ & \left(k_n^t \frac{h_N^{t+\Delta t, m+1} - h_p^{t+\Delta t, m+1}}{\Delta y} + k_n^t - \right. \\ & \left. k_s^t \frac{h_p^{t+\Delta t, m+1} - h_s^{t+\Delta t, m+1}}{\Delta y} - k_s^t \right) \end{aligned} \quad (15)$$

بالانویس های t و m : به ترتیب نشان دهنده سطح زمانی و سطح تکرار است. سری کوتاه تیلور برای رطوبت در مرحله زمانی جدید و تکرار جدید $\theta^{t+\Delta t, m+1}$ به شکل زیر است:

یکانی مطلق و همکاران: اتصال معادله های ناویر استوکس و ریچاردز...



شکل ۳-الف) مدل شبکه بندی ب) نتایج استقلال از شبکه برای شعاع و عمق خیس شدگی ج) شرایط مرزی استفاده شده در مدل

شوند به دست آمده است. معیار تعیین گام زمانی در حل عددی جریانات ناپایا عدد کورانت که در واقع گام زمانی بی بعد است، می باشد. عدد کورانت به شکل $Co = Udt/dx$ تعریف می شود که در این رابطه Co : عدد کورانت، dt : گام زمانی، dx : طول کوچکترین مش و U : سرعت جریان خروجی از قطره چکان است. در مدل عددی پیشنهادی به ازای دبی ها و بافت های مختلف خاک استقلال از مقدار گام زمانی (یا عدد کورانت) مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج مربوط به شرایط بیشترین دبی (۲/۰۵ لیتر بر ساعت) و بیشترین نفوذ (خاک شنی) در شکل (۵) ارائه شده است. با توجه به شکل می توان مشاهده کرد که با کم کردن عدد کورانت تا مقدار کورانت ۰/۵ نتایج خطای نسبی حل برای شعاع و عمق خیس شدگی تغییر می کند ولی در عدد کورانت پایین تر از ۰/۵ نتایج تغییر نمی کند، یعنی نتایج از گام زمانی مستقل شده اند. برای سایر دبی ها و بافت های خاک بررسی نشان داد که در کورانت ۰/۵ نتایج مستقل از گام زمانی می شوند لذا این گام زمانی (عدد کورانت) به عنوان گام زمانی مناسب برای حل مورد استفاده قرار گرفت.

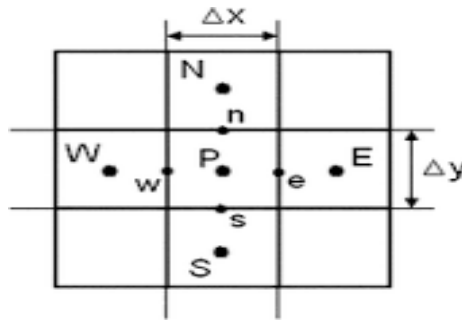
$$\lambda = - \left[(k_n^t + k_w^t + k_e^t) \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + C_p^t \right] \quad (25)$$

$$\varepsilon = \theta_p^{t+\Delta t, m} - \theta_p^t - C_p^t h_p^{t+\Delta t, m} + (3k_s^t - k_n^t) \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) \quad (26)$$

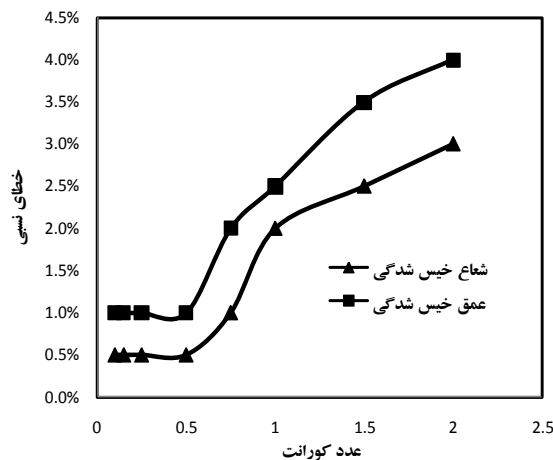
دستگاه معادله های جبری حاصل از گسسته سازی نیز در این تحقیق با روش TDMA حل گردید.

تعیین گام زمانی و نتایج کیفی شبیه سازی شده جریان سطحی و زیرسطحی (تغییرات کانتور رنگی کسر حجمی رطوبت با زمان)

همان طور که از ذات مساله مورد بررسی پیداست این مساله یک مساله ناپایا می باشد که طی آن آب از قطره چکان خارج و پس برخورد به سطح، بر روی سطح روان شده و به داخل خاک نفوذ می کند. در مدل عددی پیشنهادی آنالیز لازم برای محاسبه کوچک ترین گام زمانی مورد نیاز که هم پدیده ها و متغیر های جریان سطحی و هم زیرسطحی در آن مستقل از گام زمانی شوند، صورت گرفته است و در کل گام زمانی که به ازای آن هم حل جریان سطحی و هم حل جریان غیر سطحی مستقل از گام زمانی



شکل ۴- گسسته سازی با حجم محدود



شکل ۵- نمودار تغییر خطای نسبی شعاع و عمق خیس شدگی بر حسب عدد کورانت

خواهد داشت، در بخشی از مرز مشترک که سیال حضور دارد، غیرصفر خواهد بود و بر این اساس معادله ریچاردز پیاز رطوبتی را نشان خواهد داد. در ادامه بدین طریق هم سیال بر روی سطح جاری خواهد شد و با جاری شدن آن بار فشار بخش های بیشتری از مرز غیر صفر می شود و از طرفی پیاز رطوبتی نیز بزرگتر می شود. در ادامه، حل به جایی می رسد که جریان سطحی (سطح اشباع) به حالت پایا می رسد و ویژگی های جریان سطحی تغییر نمی کند (این همان سطح اشباعی است که در مدل های عددی قبلی به عنوان ورودی از آزمایش تعیین و وارد نرم افزار می شد)، حتی در این حالت نیز در الگوریتم حاضر جریان سطحی و زیر سطحی با هم حل می شوند. البته بهتر است با هوشیارتر کردن الگوریتم حل در این شرایط معادله های ناویر استوکس را از روند حل خارج و فقط معادله ریچاردز را حل کرد. برای بررسی بیشتر در ادامه نتایج کمی شبیه سازی صورت گرفته در دبی ها و بافت های مختلف خاک آورده شده است.

نتایج و بحث

نتایج کمی شبیه سازی عددی در پیش روی جبهه رطوبتی

شکل (۷) نتایج جبهه رطوبتی پیش بینی شده توسط مدل عددی ارائه شده را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بوسجان و همکاران

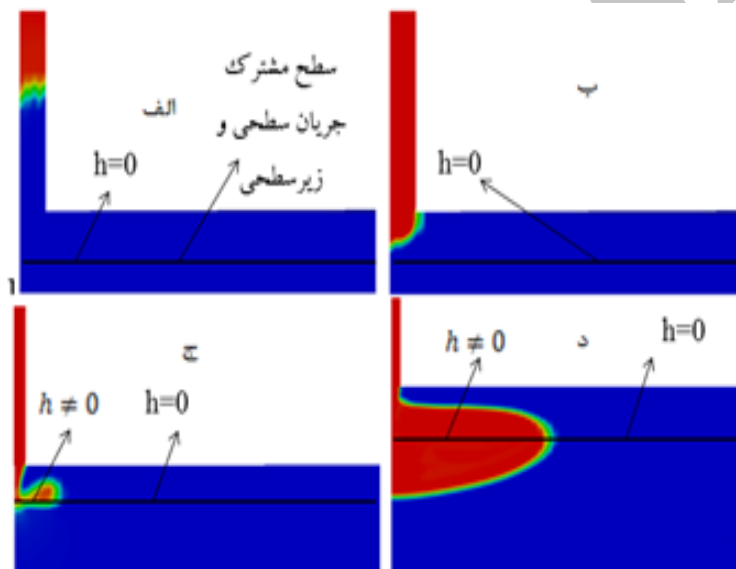
شکل (۶) نتایج کیفی کسر حجمی رطوبت را در زمان های مختلف در دبی ۲/۰۵ لیتر در ساعت در خاک با بافت سنی نشان می دهد. رنگ قرمز نشان گر بخشی است که آب حضور دارد و رنگ آبی بخش هوا می باشد. در ادامه به منظور شرح بیشتر روش عددی و ارائه نتایج کیفی حل به بررسی شکل (۶) پرداخته می شود. برای حل مساله در الگوریتم عددی در انتهای گام زمانی کوچک تعیین شده، همواره اطلاعات جریان سطحی و زیر سطحی تبادل می شود. حال ممکن است در طول حل در یک زمان مشخص (مثلا زمان های ابتدایی که قطره در حال خارج شدن از قطره چکان است) اصلا جریان زیرسطحی وجود نداشته باشد (وقتی قطره هنوز به زمین نرسیده است) شکل (۶-الف) حتی در این لحظات نیز اطلاعات مابین جریان سطحی و زیرسطحی مبادله می شود ولی با توجه به اینکه شرط مرزی جریان زیرسطحی در فصل مشترک خاک و هوا که به دلیل عدم وجود سیال برابر صفر است مقدار پیاز رطوبتی به دست آمده از حل معادله ریچاردز مسلما صفر خواهد بود (البته می توان با روش هایی، الگوریتم را هوشیار و در این لحظات که سیال هنوز به سطح نرسیده معادله های ریچاردز را حل نکرد). در لحظات بعدی با برخورد سیال به سطح، شکل (۶-ج) و روان شدن سیال روی سطح، شکل (۶-د) بار فشاری که سیال روی سطح خاک

بررسی ضرایب تبیین در دبی ها و بافت های مختلف خاک مطابق شکل (۷)، که در محدوده (۰/۹۹۷-۰/۹۸۲) متغیر می باشد توانایی بالای این مدل را در شبیه سازی جبهه رطوبتی نشان می دهد. برای بررسی بیشتر در جدول های (۲) و (۳) مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و کارایی مدل حاضر و نرم افزار هایدروس برای دو شاخص فاصله شعاعی جبهه رطوبتی تا محل قطره چکان (z) و عمق پیشروی جبهه رطوبتی (d) آورده شده است. همان طور که نتایج این جداول نشان می دهد مدل ارائه شده دارای مقادیر پایین مجذور میانگین مربعات خطا می باشد. همچنین کارایی مدل ارائه شده در این تحقیق به عدد یک نزدیک می باشد که نشان دهنده کارایی بالای مدل ارائه شده می باشد. مقایسه این پارامترها بین مدل حاضر و نرم افزار هایدروس دقت بالای مدل ارائه شده را نسبت به هایدروس در برآورد شعاع و عمق خیس شده، نشان می دهد.

(۲۰۱۴) و نرم افزار هایدروس نشان می دهد. این شکل ها شعاع و عمق پیشروی جبهه رطوبتی را در دبی های ۰/۱۱، ۰/۴۹، ۰/۹۹، ۱/۵۱ و ۲/۰۵ لیتر در ساعت و به ازای کاربرد ۲۰ لیتر آب نشان می دهد. بررسی نتایج از روی این شکل ها این واقعیت را آشکار می سازد که نتایج مدل ارائه شده همخوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

بررسی دقت مدل ارائه

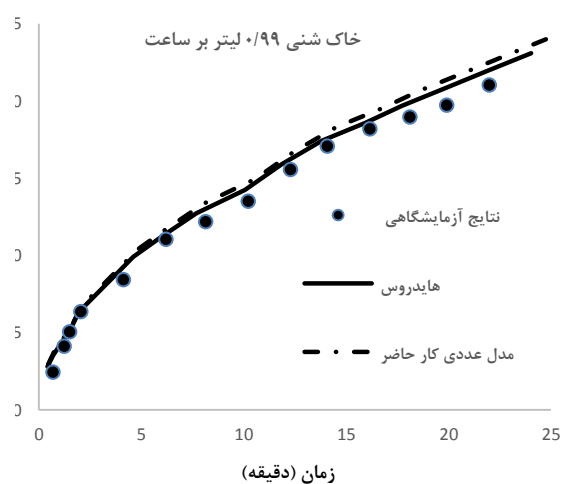
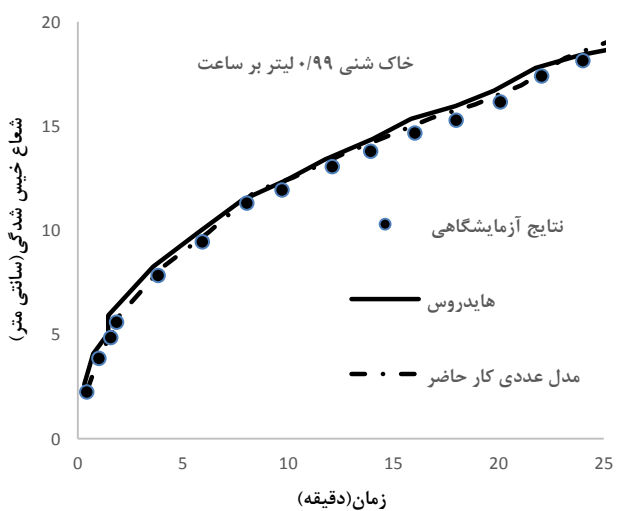
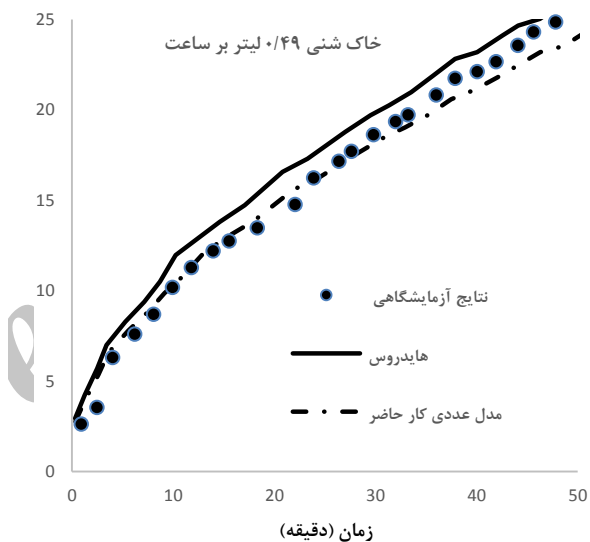
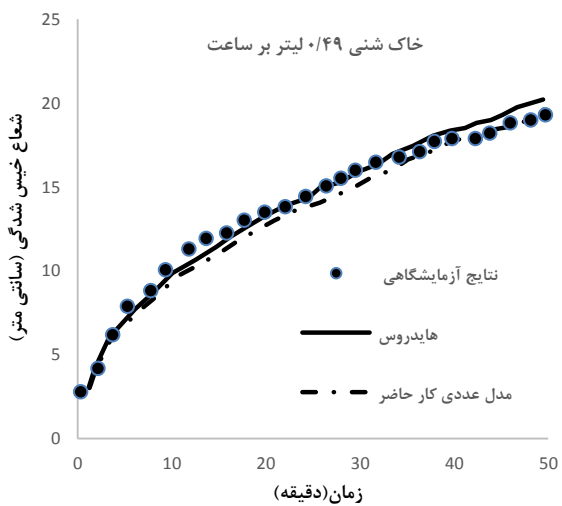
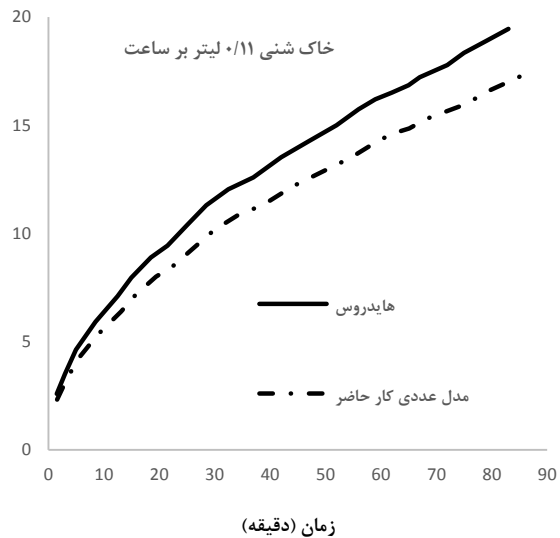
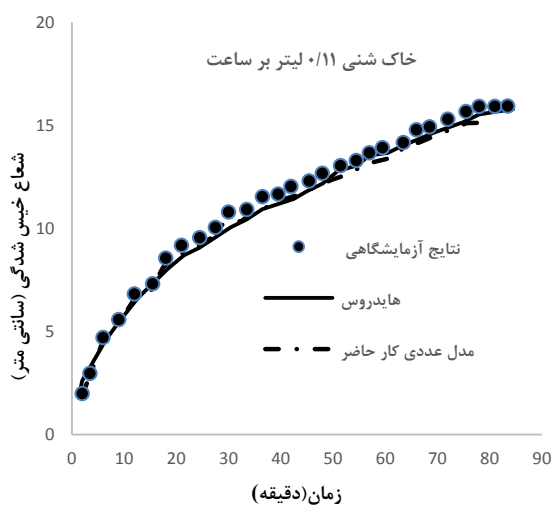
برای بررسی دقت مدل ارائه شده فاصله شعاعی جبهه رطوبتی تا محل قطره چکان (Z) و عمق پیشروی جبهه رطوبتی (d) در مختصات (x,y) نشان داده شده در شکل (۲) در دو بافت خاک و در دبی های مختلف با شاخص های آماری مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در شکل (۸) نمودار پراکنش فواصل شعاعی و عمقی مشاهداتی و شبیه سازی شده نشان داده شده است.



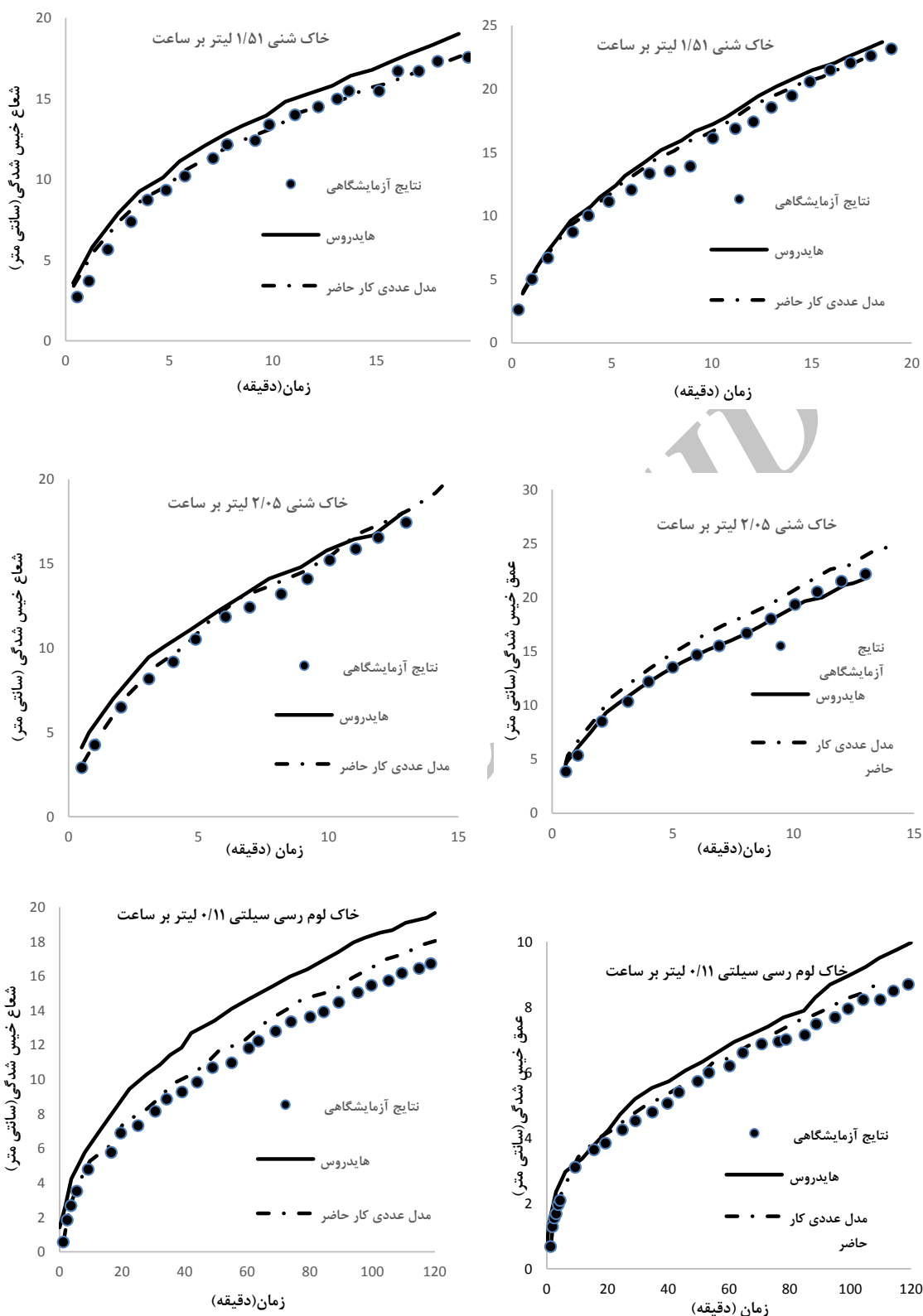
شکل ۶- نتایج کیفی شبیه سازی جریان سطحی و زیر سطحی در دبی ۲/۰۵ لیتر در ساعت در خاک با بافت شنی

جدول ۲- مقادیر میانگین مجذور مربعات خطا در دبی ها و بافت های مختلف خاک بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر حاصل از مدل عددی پیشنهادی و نرم افزار هایدروس

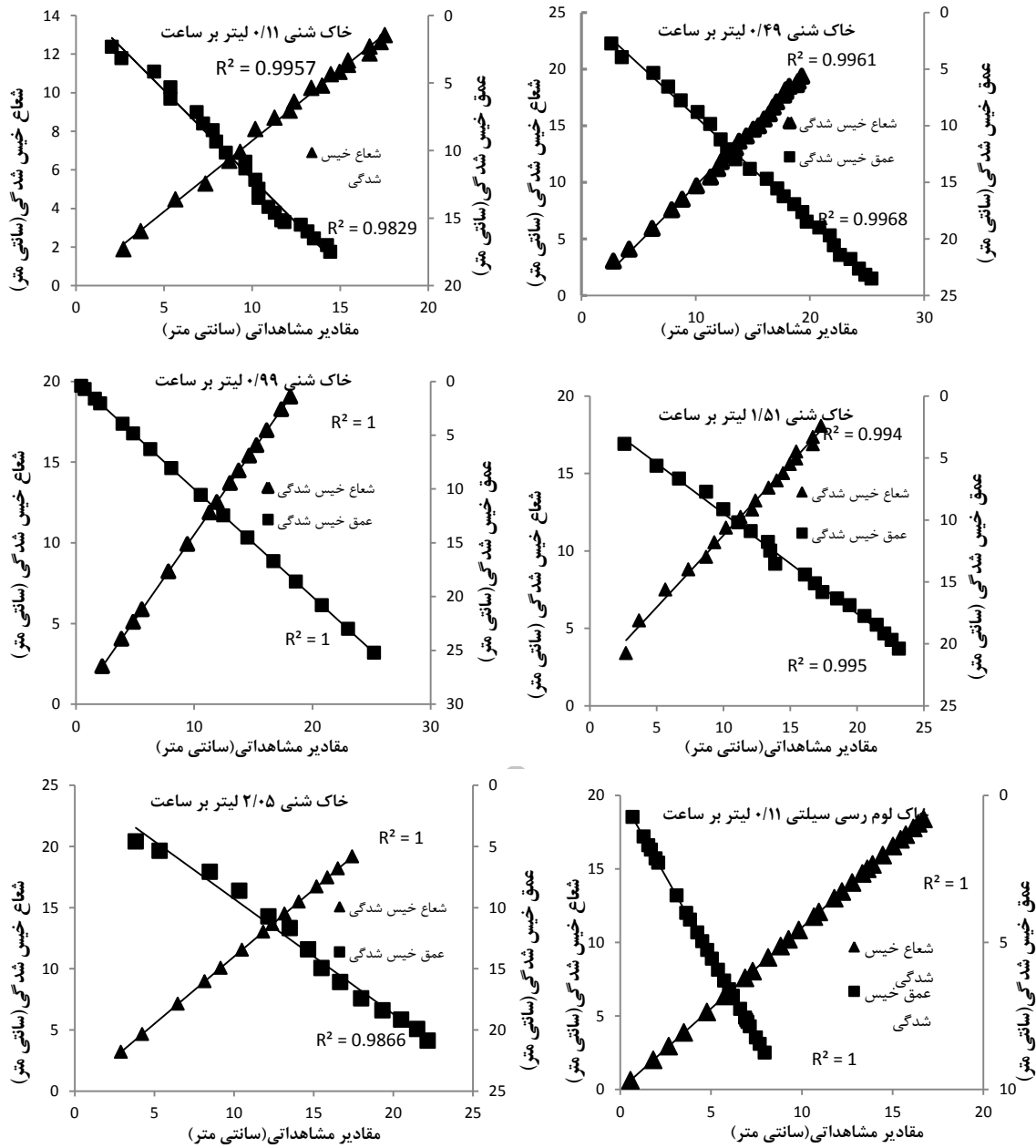
ردیف	بافت خاک	q(lit/hr)	RMSE(z) هایدروس	RMSE(z) مدل پیشنهادی	RMSE(d) هایدروس	RMSE(d) مدل پیشنهادی
۱	شنی	۰/۱۱	۰/۴۵۱	۰/۴۷۸	۳/۰۵۹	۰/۷۵۰
۲	شنی	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۳۱۱	۱/۲۵۲	۰/۸۴۸
۳	شنی	۰/۹۹	۰/۵۷۲	۰/۳۰۳	۰/۹۶۱	۰/۴۹۱
۴	شنی	۱/۵۱	۱/۶۲۳	۰/۸۰۲	۰/۸۹۵	۰/۴
۵	شنی	۲/۰۵	۰/۵۸۹	۰/۱۵۲	۰/۴۲۵	۰/۲۷۵
۶	لوم رسی سیلتی	۰/۱۱	۲/۹۳۰	۱/۱۶۳	۰/۷۳۳	۰/۳۶۶



یکانی مطلق و همکاران: اتصال معادله های ناویر استوکس و ریچاردز...



شکل ۷- نتایج جبهه رطوبتی در آبیاری قطره ای در بافت و دبی های مختلف



شکل ۸- نمودار پراکنش فواصل شعاعی و عمقی مشاهداتی و شبیه سازی شده

جدول ۳- مقادیر کارایی مدل در دبی ها و بافت های مختلف خاک بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر حاصل در مدل عددی پیشنهادی و نرم افزار هایدروس

ردیف	بافت خاک	q(lit/hr)	هایدروس EF(z)	مدل پیشنهادی EF(z)	هایدروس EF(d)	پیشنهادی EF(d)
۱	شننی	۰/۱۱	۰/۹۶۸	۰/۹۶۴	۰/۸۹	۰/۹۱۹
۲	شننی	۰/۴۹	۰/۹۷۹	۰/۹۹۳	۰/۹۶۰	۰/۹۸۱
۳	شننی	۰/۹۹	۰/۹۴۹	۰/۹۸۶	۰/۹۸۴	۰/۹۳۸
۴	شننی	۱/۵۱	۰/۴۱۲	۰/۸۵۷	۰/۹۰۵	۰/۹۸۱
۵	شننی	۲/۰۵	۰/۹۷۱	۰/۹۹۸	۰/۹۹۰	۰/۹۹۶
۶	لوم رسی سیلتی	۰/۱۱	۰/۲۳۳	۰/۸۷۹	۰/۷۶۸	۰/۹۴۲

یکانی مطلق و همکاران: اتصال معادله های ناویر استوکس و ریچاردز...

جدول ۴- درصد خطای نسبی مقادیر پیش بینی شده با مدل عددی پیشنهادی و نرم افزار هایدروس

ردیف	بافت خاک	q(lit/hr)	t(min)	d(cm)	z(cm)	هایدروس d(cm)	هایدروس z(cm)	مدل عددی پیشنهادی d(cm)	مدل عددی پیشنهادی z(cm)	خطای نسبی هایدروس z(%)	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی z(%)	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی d(%)	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱	شنی	۰/۱۱	۲۰	۷/۷۸	۹/۱۶	۹/۴۴	۸/۷	۸	۹	-۵/۱	۲/۱	۲/۹	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۲	شنی	۰/۱۱	۳۰	۹/۶۳	۱۰/۷۸	۱۲/۰۴	۱۰/۰۶	۱۰/۵	۱۰/۲۴	-۶/۷	-۵	۹	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۳	شنی	۰/۱۱	۵۰	۱۱/۳	۱۳/۰۳	۱۵	۱۲/۸	۱۲	۱۲/۳۸	-۱/۸	-۵	۶/۲	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۴	شنی	۰/۱۱	۸۰	۱۵	۱۵/۹۱	۱۸/۸۹	۱۵/۷۸	۱۶	۱۵/۵	-۰/۹	-۲/۶	۶/۷	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۵	شنی	۰/۴۹	۱۰	۱۰/۱۷	۱۰/۰۶	۱۱/۹۶	۹/۸۸	۱۱/۲۴	۹/۹۹	-۱/۸	-۰/۷	۱۰/۶	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۶	شنی	۰/۴۹	۳۰	۱۸/۶۱	۱۵/۹۹	۱۹/۶۹	۱۵/۹	۱۸/۵۱	۱۵/۹	-۰/۶	-۰/۵	-۰/۵	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۷	شنی	۰/۴۹	۵۰	۲۵/۳۹	۱۹/۲۹	۲۵/۹۵	۲/۲۲	۲۴/۳۰	۱۹/۸۲	۴/۸	۲/۸	-۳/۹	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۸	شنی	۰/۹۹	۱۰	۱۳/۴۹	۱۱/۹۳	۱۴/۲۴	۱۲/۴۲	۱۴/۹۵	۱۲/۳	۴/۱	۳/۱	۱۰/۸	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۹	شنی	۰/۹۹	۱۵	۱۸/۲	۱۴/۶۶	۱۸/۵۶	۱۵/۳۵	۱۷/۵	۱۵	۴/۷	۲/۳	-۳/۸	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱۰	شنی	۰/۹۹	۲۵	۲۲/۹۱	۱۸/۱۴	۲۳/۱	۱۸/۶۴	۲۲/۵	۱۸	۲/۸	-۰/۸	-۱/۸	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱۱	شنی	۱/۵۱	۱۰	۱۶/۱۱	۱۲/۳۹	۱۷/۲۲	۱۳/۹۵	۱۶/۳۶	۱۳/۲۵	۱۲/۶	۶/۹	۱/۵	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱۲	شنی	۱/۵۱	۱۵	۲۰/۵۶	۱۵/۴۶	۲۱/۴۸	۱۷/۲۸	۲۰/۴۱	۱۶/۴۲	۱۱/۸	۶/۲	-۰/۷	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱۳	شنی	۱/۵۱	۲۰	۲۳/۱۵	۱۷/۵۵	۲۳/۷	۱۹/۰۱	۲۲/۵۲	۱۸/۰۶	۸/۴	۲/۹	-۲/۷	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱۴	شنی	۲/۰۵	۵	۱۳/۵	۱۰/۵	۱۳	۱۱/۱۱	۱۳/۳	۱۰/۳	۵/۸	-۱/۹	-۱/۵	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱۵	شنی	۲/۰۵	۱۳	۲۲/۱۷	۱۷/۴۳	۲۱/۸۳	۱۸	۲۲/۵	۱۷/۵	۳/۳	۰/۴	۱/۵	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱۶	لوم رسی سیلنتی	۰/۱۱	۲۵	۴/۲۵	۷/۳	۴/۷۲	۱۰/۲۹	۴	۸/۰۳	۴۰/۸	۹/۹	-۵/۸	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱۷	لوم رسی سیلنتی	۰/۱۱	۵۰	۵/۷۳	۱۰/۶۷	۶/۳۴	۱۳/۴	۵/۲	۱۱/۷۴	۲۵/۵	۱۰	-۹/۳	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی
۱۸	لوم رسی سیلنتی	۰/۱۱	۱۰۰	۷/۹۶	۱۵/۴۵	۸/۹۷	۱۸/۵۲	۸/۲	۱۶/۹۹	۱۹/۹	۱۰	۳/۱	خطای نسبی مدل عددی پیشنهادی

که یک کد متن باز دینامیک سیالات محاسباتی با قابلیت های بسیار بالا می باشد، توسعه داده شده است. این کد بر اساس روش حجم محدود و به زبان ++C شی گرا نوشته شده است. در این تحقیق ابتدا معادله های ریچاردز به روش حجم محدود گسسته سازی شد و به زبان برنامه نویسی ++C نوشته شد و بر اساس الگوریتم ارائه شده در این تحقیق با معادله های جریان سطحی دو فاز جفت گردید. نتایج مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی در دسترس و نتایج نرم افزار هایدروس مقایسه گردید. نتایج شبیه سازی با مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی و نرم افزار هایدروس در دو بافت خاک و در دبی های مختلف این واقعیت را آشکار ساخت که این مدل به دلیل داشتن کمترین میزان خطا و بالاترین کارایی، توانایی و دقت بالایی در شبیه سازی جبهه رطوبتی دارد. در واقع با کاربرد این مدل نیازی برای انجام آزمایش های میدانی وجود ندارد و با توجه به تست های عددی و کارایی بالای مدل، در بازه بزرگی از دبی ها و بافت های خاک قابل استفاده می باشد. همچنین این مدل قابل استفاده در مسائلی که تقابل بین جریان های سطحی و زیر سطحی وجود دارد، از جمله در آبیاری سطحی، هیدرولوژی و مسائل نشت و نفوذ کارایی داشته و اطلاعات کاملی در مورد میدان سرعت، فشار و سطح مشترک جریان دو فاز سطحی ارائه می دهد. همچنین با توسعه این مدل و اتصال معادله های انتقال جرم و اصلاح می توان کارایی این مدل را در مسائل آب و خاک بالا برد.

در جدول (۴) درصد خطای نسبی مقادیر پیش بینی شده با مدل حاضر و نرم افزار هایدروس ارائه شده است همان طور که از جدول (۴) ملاحظه می شود درصد خطای نسبی پیش بینی شعاع خیس شدگی (Z) با مدل حاضر مابین (۰/۴-۱۰) و دارای میانگین قدر مطلق ۴ می باشد که این مقادیر با نرم افزار هایدروس در بازه (۰/۶-۴۰/۸) متغیر بوده و دارای میانگین قدر مطلق ۹ می باشد و همچنین در صد خطای نسبی عمق خیس شدگی (d) با مدل حاضر بین (۰/۵-۱۰/۸) و دارای میانگین قدر مطلق ۴/۶ می باشد که برآورد عمق خیس شدگی با نرم افزار هایدروس دارای خطای نسبی (۰/۸-۳۲/۸) و میانگین قدر مطلق ۱۰/۷ می باشد، که در واقع می توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده هم توانایی بالایی در برآورد سطح و عمق خیس شده داشته و هم نسبت به مدل هایدروس دارای دقت بیشتری می باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق برای پیش بینی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره ای سطحی، مدل جدید با جفت نمودن معادله های ناویر استوکس و ریچاردز ارائه شده است. با توجه به اینکه مدل های عددی ارائه شده برای حل نیازمند تعیین سطح تغذیه اشباع خاک می باشد که این سطح معمولا از طریق آزمایش میدانی و یا سعی و خطا به دست می آید ارائه مدلی که بی نیاز به این اطلاعات باشد در این تحقیق بسط داده شده است. برای این منظور کد OpenFOAM

منابع

- 1- Al-Qinna, M.I. and, A.M. Abu-Awwad, 2001. Wetting patterns under trickle source in arid soils with surface crust. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80(3):301-305.
- 2- Angelakis, A.N., Rolston, D.E., Kadir, T.N. and V.H. Scott, 1993. Soil water distribution under trickle source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 119(3): 484-500.
- 3- Ben-Asher, J., DO. Lomen, and AW. Warrick, 1978. Linear and nonlinear models of infiltration from a point source. *Soil Science Society of American Journal*, 42(1):3-6.
- 4- Ben-Asher, J., 1986. Infiltration and water extraction from trickle irrigation source: The effective hemisphere model. *Soil Science Society of American Journal*, 50 (4): 882-887.
- 5- Bhatnagar, P.R. and H.S. Chauhan, 2008. Soil water movement under a single surface trickle source. *Agriculture Water Management*, 95: 799-808.
- 6- Boštjan N., Kechavarzi, C., Coulon F. and M. Pintar, 2014. Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size *Irrigation Science*, 32:421-436,.
- 7- Bufon, V.B., Lascano, R.J. and C. Bednarz, 2012. Soil water content on drip irrigated cotton: Comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus 2-D model. *Irrigation Science*, 30:259-273.
- 8- Chen, J.M., Tan, Y.C. and Y.Z. Wu, 2006. A study of the infiltration of trickle irrigation. 7th International Micro Irrigation Congress, September 10 – 16, Kuala Lumpur, Malaysia.

- 9- Cook, F.J., Fitch, P., Thorburn, P.J., Charlesworth, P.B. and K.L. Bristow, 2006. Modelling trickle irrigation: Comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environmental Modelling and Software*, 21: 1353-1359.
- 10-Dabral, P. P., Pandey, P. K., Pandey, A., Singh, K.P. and M. Sanjoy, 2012. Modelling of wetting pattern under trickle source in sandy soil of Nirjuli, Arunachal Pradesh (India). *Irrigation Science*, 30:287–292.
- 11-Elmaloglou, S. and N. Malamos, 2006. A methodology for determining the surface and vertical components of the wetting front under a surface point source, with root water-uptake and evaporation. *Irrigation and Drainage*, 55 (1): 99–111.
- 12-Hirt, C.W. and B.D. Nicholas, 1992. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39: 201-225.
- 13-Kandelous, MM. and J. Simunek, 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*. 28:435–444.
- 14-Keyyan, M. and RT. Peters, 2011. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 137:530–537.
- 15-Kohne, J.M., Wohling, T. and V. Pot, 2011. Coupled simulation of surface runoff and soil water flow using multi-objective parameter estimation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 403 (1–4): 141–156.
- 16-Kong, J., Xin, P., Song, Z. and L. Li. 2010. A new model for coupling surface and subsurface water flows: With an application to a lagoon. . *Journal of Hydraulic Engineering*, 390 (2–4): 116–120.
- 17-Lafolie, F., Geunnelon, R. and MTh. van Genuchten 1989. Analysis of water flow under trickle irrigation: II. Experimental evaluation. *Soil Science Society of American Journal*, 53:1318–1323.
- 18-Lazarovitch N., Warrick, A.W, Furman, A. and J. Simunek 2007. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *Vadose Zone Journal*, 6:116–123.
- 19- Lazarovitch, N., Poulton, M., Furman, A. and AW. Warrick 2009. Water distribution under trickle irrigation predicted using artificial neural networks. *Journal of Engineering Mathematics*, 64:207–218.
- 20-Levin, I., Van Rooyen, P.C. and F.C. Van Rooyen, 1979. The Effect of discharge rate and intermittent water application by point –source irrigation on the soil moisture distribution pattern. *Soil Science Society of American Journal*, 43(1): 8-16.
- 21-Morita, M. and B. C. Yen, 2002 .Modeling of conjunctive two dimensional surface-three-dimensional subsurface flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(2): 184–200.
- 22-Panday, S. and P. S. Huyakorn, 2004. A fully coupled physically based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources*, 27: (4): 361–382.
- 23-Philip, J.R. 1971. General theorem on steady infiltration from surface source, with application to point and line sources. *Soil Science Society of American Journal*, 35(6): 867–871.
- 24- Philip, J.R., 1984. Travel time from buried and surface infiltration point sources. *Water Resource Research*, 20(7): 990-994.
- 25-Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 133(4): 342-349.
- 26-Richards, L. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics* 1(5):318–333.

- 27-Simunek, J., Sejna, M., and MTh. Genuchten 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0. Rep. IGCWMC-TPS-53, p 251, International Ground Water Model. Cent., Colo. Sch. of Mines, Golden, CO.
- 28-Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J. and P.J. Shouse, 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 130(4): 304-310.
- 29-Smith, J.U., Smith, P. and T.M. Addiscott, 1996. Quantitative methods to evaluate and compare soil organic matter (SOM) models. In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (eds) Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets NATO Advanced Research Workshop: Papers, NATO ASI Series 1 Edn, Vol 38, NATO ASI series I Global Environmental Change, Vol 38, Springer, Heidelberg.
- 30-Subbaiah, R. 2013. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31:225-258.
- 31-Thorburn, P.J., Cook, F.J., and K.L. Bristow, 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: Implications for system design and management. *Irrigation Science*, 22: 121-127.
- 32-Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44: 892-898.
- 33-Wohling, Th. and G. H. Schmitz, 2007a. Physically based coupled model for simulating 1D surface-2D subsurface flow and plant water uptake in irrigation furrows. I: Model development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 133(6): 538-547.
- 34-Wohling, Th., and G. H. Schmitz, 2007b. Physically based coupled model for simulating 1D surface-2D subsurface flow and plant water uptake in irrigation furrows. II: Model test and evaluation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 133(6): 548-558.
- 35-Zerihun, D., Furman, A., Warrick, A. W., and C. A. Sanchez, 2005a. A coupled surface- subsurface solute transport model for irrigation borders and basins: I. Model development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 131(5): 396-406.
- 36-Zerihun, D., Sanchez, C. A., Furman, A., and A. W. Warrick, 2005b. A coupled surface- subsurface solute transport model for irrigation borders and basins, II. Model evaluation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 131(5): 407-419.
- 37-Zhigang, L., Pingping, L., Yongguang, H., and W. Jizhang 2015. Wetting patterns and water distributions in cultivation media under drip irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112:200-208.