Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 3, Jul.-Agu. 2014, p. 546-555

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۳، ص. ۵۵۵-۵۴۶

شبیه سازی عددی جریان دو بعدی غیرماندگار اشباع- غیراشباع به طرف زهکش ها

رسول قبادیان[1]

تاریخ دریافت:۱۳۹۲/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش:۱۳۹۳/۴/۲

چکیده

به منظور طراحی و ارزیابی سیستم‌های زهکشی می‌توان جریان آب به طرف زهکش ها، تغییرات تراز سطح ایستابی و تخلیه زهکش ها را شبیه سازی نمود. پیشرفت‌های اخیر در روش‌های عددی و رایانه ای این امکان را فراهم نموده که بتوان معادلات دیفرانسیل غیر خطی حاکم بر جریان آب در خاک اشباع –غیراشباع را حل نمود. از اینرو در این تحقیق مدلی کامپیوتری تهیه شده است که در آن معادله دوبعدی جریان غیرماندگار در خاک اشباع– غیراشباع به روش حجم کنترل و روش گسسته سازی کرنک- نیکلسون حل شد. ارتباط هدایت هیدرولیکی غیراشباع و بار فشاری با استفاده از رابطه ون گنوختن انجام شد. صحت سنجی دقیق مدل نشان داد که نتایج حل مسئله به روش حجم کنترل نتایج روش عناصر محدود را تایید می‌کند. پس از صحت سنجی، نوسانات سطح ایستابی بین دو زهکش به فاصله ۲۰ متر و عمق نصب ۱۲۰ سانتیمتری شبیه سازی شد. نتایج نشان داد برای شرایط تخلیه (بدون آبیاری و بارندگی)، دبی زهکشی و سطح ایستابی در ابتدا به شدت و سپس به آرامی افت پیدا می‌کند. در حالت تغذیه عکس این امر به وقوع می‌پیوندد. دبی خروجی از زهکش بلافاصله بعد از تغذیه از سطح زمین افزایش نمی یابد بلکه با تاخیر رخ می‌دهد. مدت زمان تاخیر در محدوده مورد مطالعه این تحقیق ۳/۱۲۵ روز محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: دبی زهکشی، رابطه ریچاردز، روش حجم محدود، روش گسسته سازی کرنک- نیکلسون، رابطه ون گنوختن

مقدمه

مدل‌های تحلیلی و عددی متعددی برای شبیه سازی نوسانات سطح ایستابی بین دو زهکش، و دبی تخلیه تهیه شده است. در مدل‌های جریان ماندگار شدت تغذیه (بارندگی و آبیاری) و تخلیه زهکش ها در طول زمان ثابت و ماندگار فرض می‌کنند به عبارتی، سطح ایستابی در طی زمان ثابت است. در مدل‌های جریان غیرماندگار شدت تغذیه، تخلیه زهکش ها و سطح ایستابی در طول زمان متغیر در نظر گرفته می‌شود. برخی محققین پس از ساده سازی، معادله ریچاردز را بصورت تحلیلی حل نموده اند (۱۰). جواب‌های حل تحلیلی برای شرایط خاص اولیه و مرزی و در حالت‌های ساده اعتبار دارد. با توجه به غیرخطی بودن معادله ریچاردز، حل تحلیلی آن امکان پذیر نیست و باید به روش‌های عددی حل شود (۱۳). تاکنون از روش‌های عددی تفاضل محدود، حجم محدود و المان محدود برای حل آن به منظور شبیه سازی جریان غیرماندگار در خاک غیراشباع استفاده شده است (۱۳). عزیزی پور و محمودیان شوشتری (۵) از روش حجم محدود برای حل معادله ریچاردز درحالت تک بعدی در خاک غیراشباع استفاده کردند و نشان دادند روش حجم محدود مقادیر فشار و رطوبت خاک را به درستی برآورد می‌کند. فرهادی و آشتیانی (۴) به روش عددی تفاضل محدود معادله یک بعدی جریان آب در خاک غیراشباع را تحلیل نمودند. با حل یک مثال متداول تاثیر روش‌های مختلف متوسط گیری شاخص غیر خطی هدایت هیدرولیکی، نحوه تخمین ضریب ذخیره ویژه، روش گسسته سازی و شرایط مختلف همگرایی بر روی دقت محاسبات مورد بررسی قرار گرفت. نوری و همکاران (۶) مدل آگروهیدرولوژیکیSWAP را در برآورد نوسانات سطح ایستابی و شدت جریان زهکشی زیرزمینی مورد ارزیابی قرار دادند. جعفری و همکاران (۳) توانایی سه مدل کراجنهوف وان دلور- ماسلند، دوزو- هلین گا و گلور-دام درپیش بینی تراز سطح ایستابی و میزان تخلیه زهکشی در جریان غیرماندگار را با اندازه گیری آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد برای سطح ایستابی خیزان پیش بینی مدل دوزو – هلین گا به واقعیت نزدیک تر است. دقت پیش بینی هر سه مدل با گذشت زمان کاسته شد و با نزدیک شدن به زمان انتهایی آزمایش به یکدیگر همگرا شدند.

سامانی و فتحی (۱۲) با بیان اینکه شبیه سازی جریان به طرف

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی کرمانشاه
Email: rsghobadian@gmail.com

زهکش ها یکی از مراحل مهم در طراحی و مدیریت سیستم‌های زهکشی است مدلی دو بعدی تهیه کردند که جریان اشباع- غیراشباع به طرف زهکش ها را به روش عددی احجام محدود شبیه سازی می‌کند. تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع و منحنی مشخصه پیشنهاد شده توسط بروکز و کوری (۷) در مدل آنها بکار گرفته شد. نهایتا با استفاده از خروجی‌های مدل خصوصیات هیدرودینامیکی خاک به روش مسئله معکوس محاسبه شد.

سیمپسون و کلمنت (۱۳) روش‌های تفاضل محدود و المان محدود را برای شبیه سازی جریان در محیط متخلخل با هم مقایسه کردند و نشان دادند که روش المان محدود از دقت بالاتری برخوردار است.

بهبهانی و رحیمی خوب (۱) یک مدل ریاضی برای پیش بینی وضعیت سطح ایستابی در حالت غیرماندگار بین دو زهکش تحت شرایط تغذیه لحظه ای در اثر بارندگی یا آبیاری ارائه کردند. در مدل آنها فرض شد خاک همگن است و هدایت هیدرولیکی اشباع در نظر گرفته شد. روش عددی ضمنی غیرمستقیم (ADI[1]) برای حل معادله جریان استفاده شد. نتایج آنها نشان داد در صورت استفاده از مدل دوبعدی در جریان غیرماندگار موقعیت سطح ایستابی دقیقتر از روش‌های تحلیلی بر آورد می‌شود.

در این تحقیق معادله ریچاردز در حالت دوبعدی به روش عددی حجم محدود و روش گسسته سازی کرنک- نیکلسون حل شد. بکار گیری روش کرنک – نیکلسون این امکان را فراهم میکند که معادله دیفرانیسل حاکم را بتوان بصورت ترکیبی از روش ضمنی و صریح منفصل نمود تا همزمان مشکل عدم پایداری و رسیدن به جواب فیزیکی حل شود. تابع ون گنختون (۱۴) برای محاسبه هدایت هیدرولیکی غیراشباع بکار گرفته و در معادله ریچاردز گنجانده شده است. بر این اساس مدلی کامپیوتری تهیه شد که قابلیت شبیه سازی حرکت آب در خاک اشباع و غیراشباع را دارد. از قابلیت‌های مدل حاضر شبیه سازی و پیش بینی جریان غیرماندگار بین دو زهکش، محاسبه دبی تخلیه، تخمین پیاز رطوبتی اطراف نقطه تزریق و همچنین شبیه سازی نوسانات سطح آب بین دو زهکشی غیر هم سطح در خاک‌های غیرهمگن و غیرایزوتروپ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

معادله حاکم بر مساله رابطه ریچاردز در شرایط جریان غیرماندگار، در محیط متخلخل غیر همروند و غیر همگن دو بعدی است. این معادله با فرض اینکه هوا نقش ناچیزی در حرکت جریان آب داشته باشد در مختصات دکارتی به شکل زیر است:

$$\frac{\partial\theta(\psi)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x(\psi)\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y(\psi)\frac{\partial\psi}{\partial y}+K_y(\psi)\right)\pm\frac{q_s}{\Delta x\Delta y} \qquad (۱)$$

که در آن θ رطوبت حجمی$[L^3/L^3]$، ψ بار فشاری [L]مثبت یا منفی، K هدایت هیدرولیکی[L/T] ، y مختصه عمودی[L] (در جهت بالا مثبت)، x مختصه افقی[L]، t زمان[T]، q_sدبی تزریق (+) یا تخلیه(-)$[L^2/T]$. Δx و Δyو به ترتیب اندازه شبکه در جهت x و y می‌باشند[L].

یکی از مشکلات اصلی که مدل‌های شبیه ساز جریان زهکشی با آن مواجه هستند تعیین پارامترهای ورودی به مدل است که حتی می‌توانند کاربرد مدل را محدود کنند. هدایت هیدرولیکی غیراشباع یکی از مهمترین پارامترهای ورودی است که با مکان و زمان تغییر می‌کند.

قبل از حل معادله ریچاردز بصورت عددی به یک مدل هدایت هیدرولیکی غیراشباع نیاز است. این مدل می‌تواند بر مبنای تابع نمایی گاردنر باشد. این مدل رابطه بین هدایت هیدرولیکی غیراشباع و بار فشاری را نشان می‌دهد. همانگونه که قبلا نیز اشاره شد این تابع در بررسی‌های لیج و همکاران (۹) در بین ۵ تابع دیگر ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد. مدل‌های Hydrus و Seep2D از جمله مشهورترین نرم افزارها در خصوص شبیه سازی جریان آب در خاک می‌باشند از تابع ون گنختون (۱۴) که عملکرد بهتری دارد استفاده می‌کنند. در این تحقیق نیر از تابع مذکورکه به شکل زیر است استفاده شد (۲ و ۱۴):

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\left[\frac{1}{1+\left(\frac{\psi_p}{\psi_b}\right)^{1+\lambda}}\right]^{\frac{\lambda}{1+\lambda}} \qquad (۲)$$

$$\frac{K(\theta)}{K_s}=\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{l}\left[1-\left(1-\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{\frac{1+\lambda}{\lambda}}\right)^{\frac{\lambda}{1+\lambda}}\right]^2 \qquad (۳)$$

$$f(\psi)=\frac{\partial\theta}{\partial\psi}=m\times(\theta_s-\theta_r)\left[\frac{1}{1+(\alpha\psi)^n}\right]^{m-1}\times\left[\frac{-n\alpha(\alpha\psi)^{n-1}}{\left(1+(\alpha\psi)^n\right)^2}\right] \qquad (۴)$$

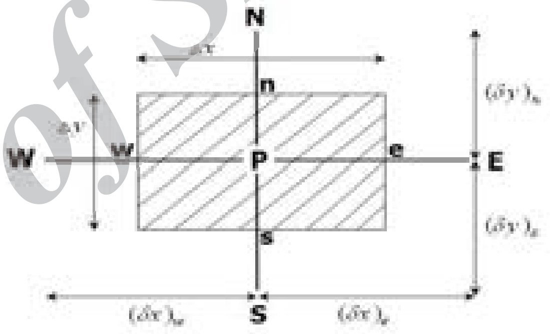
1- Alternating Direction Implicit

$$\alpha=\frac{1}{\psi_b}\quad ,n=1+\lambda\quad ,\ m=1-\frac{1}{n} \qquad (۵)$$

در این روابط Se رطوبت موثر، K_S هدایت هیدرولیکی اشباع [L/T]، θ_r و θ_s رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع [L^3/L^3]، l پارامتر توزیع خلل و فرج، α [1/L]، n و m پارامترهای تجربی هستند. پارامتر l در تابع هدایت هیدرولیکی به وسیله معلم (۱۱) برای اکثر خاک‌ها به طور متوسط ۰/۵ تخمین زده شده است. در روابط فوق پارامترهای θ_r، θ_S، K_S، α، n بر ای هر بافت خاکی متفاوت هستند.

منفصل سازی معادله حاکم

در این تحقیق برای منفصل کردن معادله دیفرانسیل ۱ از روش حجم کنترل (F.V) استفاده شده است (۱۵). در این روش ابتدا از معادله حاکم (رابطه ۱) روی حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۱ انتگرال گرفته می‌شود.



شکل ۱- معرفی نقطه P و حجم کنترل مربوط به آن

$$\int_s^n\int_w^e\int_t^{t+dt}\frac{\partial\theta(\psi_p)}{\partial t}dt\,dx\,dy=\int_t^{t+dt}\int_s^n\int_w^e\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x(\psi_p)\frac{\partial\psi_p}{\partial x}\right)dx\,dy\,dt$$
$$+\int_t^{t+dt}\int_w^e\int_s^n\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y(\psi_p)\frac{\partial\psi_p}{\partial y}+K_y(\psi_p)\right)dy\,dx\,dt$$
$$+\int_t^{t+dt}\int_w^e\int_s^n\frac{\pm q_s}{\Delta x\Delta y}dy\,dx\,dt$$

(۶)

پس از منفصل نمودن[1] به روش کرنک- نیکلسون نهایتا معادلـه دیفرانسیل ۱ به معادله جبری ۷ تبدیل می‌شود:

$$A_P\times\psi_E^{t+dt}+B_P\times\psi_N^{t+dt}+C_P\times\psi_p^{t+dt}$$
$$+D_P\times\psi_w^{t+dt}+E_P\times\psi_S^{t+dt}=F_P \qquad (۷)$$

که در آن:

$$A_P=\phi K(\psi)_e\frac{dy\,dt}{\delta x_e}$$
$$B_P=\phi K(\psi)_n\frac{dx\,dt}{\delta y_n}$$
$$D_P=\phi K(\psi)_w\frac{dy\,dt}{\delta x_w}$$
$$E_P=\phi K(\psi)_S\frac{dx\,dt}{\delta y_s}$$
$$C_P=-(A_P+B_P+D_P+E_P)-f(\psi)dx\,dy$$
$$F_P=(K(\psi)_S-K(\psi)_n)dx\,dt-f(\psi)dx\,dy\,\psi_p^t$$
$$-(1-\phi)K(\psi)_e\frac{dy\,dt}{\delta x_e}(\psi_E^t-\psi_P^t)$$
$$+(1-\phi)K(\psi)_w\frac{dy\,dt}{\delta x_w}(\psi_P^t-\psi_W^t)$$
$$-(1-\phi)K(\psi)_n\frac{dx\,dt}{\delta y_n}(\psi_N^t-\psi_P^t)$$
$$+(1-\phi)K(\psi)_s\frac{dx\,dt}{\delta y_s}(\psi_P^t-\psi_S^t)\mp q_s dt$$

q_s برای همه گره ها بجر گره زهکش یـا چاه تزریـق برابـر صـفر است. $K(\psi)_e$ ضریب نفوذ پذیری در روی وجه شرقی حجـم کنتـرل شکل ۱ می‌باشد و در این تحقیق بصورت میانگین هارمونیک ضـریب نفوذپذیری نقاط P و E در نظر گرفته می‌شود:

$$K(\psi)_e=\frac{2K(\psi)_E\,K(\psi)_P}{K(\psi)_E+K(\psi)_P} \qquad (۸)$$

در شرایطی که نقطه مرکزی حجم کنترل (P) بـر روی مرزهـای نفوذ ناپذیر، یکی از گوشه های محدوده شبکه بندی شده، قرار بگیـرد رابطه ۱ باید بصورت‌های خاص منفصل شود.

محدوده مورد مطالعه، شرایط اولیه و مرزی

محدود مورد مطالعه شامل توده ای خاک با عمق ۲ متـر و طـول ۲۰ متر می‌باشد. دو عدد زهکش در عمق ۱/۲ متـری از سـطح خـاک قرار داده شده است. در ابتدای محاسبات فرض شد کـه رقـوم سـطح آب برابر رقوم سطح زمین طبیعی است بر این اساس فـشار در تمـام گره ها محاسبه و به عنوان شرط اولیه به مدل داده شد. اندازه شبکه در جهت عمق ۱۰ سانتیمتر و در جهت افقی ۱۰۰ سانتی متـر در نظـر گرفته شد. گام زمانی محاسبات ۶۰ ثانیه است.

شرایط مرزی

برای تمام گره ها روی مرزهـای (AE) و (BF) شـرط گرادیـان فشار صفر در جهت افقـی ($\frac{\partial\psi}{\partial x}=0$) برقـرار اسـت، از اینـرو معادلـه جبری عمومی (رابطه ۷) بـرای نقـاط روی مـرز AE بـه شـکل زیـر

1- Discretisating

خلاصه می‌شود:

$$A_P\times\psi_E^{t+dt}+B_P\times\psi_N^{t+dt}+C_P\times\psi_p^{t+dt}+E_P\times\psi_S^{t+dt}=F_P \qquad (۹)$$

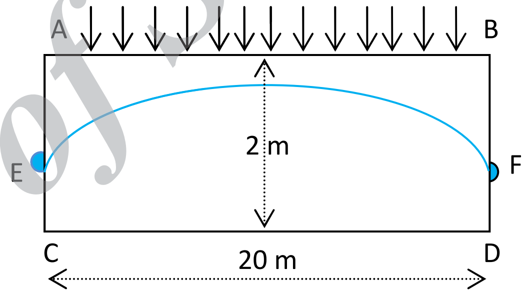
$$A_P=\phi K(\psi)_e\frac{dy\,dt}{\delta x_e}$$

$$B_P=\phi K(\psi)_n\frac{dx\,dt}{2\delta y_n}$$

$$E_P=\phi K(\psi)_S\frac{dx\,dt}{2\delta y_s}$$

$$C_P=-(A_P+B_P+E_P)-0.5\times f(\psi)dx\,dy$$

$$\begin{aligned}F_P=&\,0.5\times(K(\psi)_S-K(\psi)_n)dx\,dt-0.5\times f(\psi)dx\,dy\,\psi_p^t\\&-(1-\phi)K(\psi)_e\frac{dy\,dt}{\delta x_e}(\psi_E^t-\psi_P^t)\\&-(1-\phi)K(\psi)_n\frac{dx\,dt}{2\delta y_n}(\psi_N^t-\psi_P^t)\\&+(1-\phi)K(\psi)_s\frac{dx\,dt}{2\delta y_s}(\psi_P^t-\psi_S^t)\end{aligned}$$



شکل ۲- محدوده مورد مطالعه

برای تمام گره‌ها روی مرز (CD) شرط گرادیان فشار مشخص در جهت عمودی ($\frac{\partial\psi}{\partial y}=-1$) برقرار است، از اینرو معادله جبری عمومی (رابطه ۷) برای نقاط روی مرز CD به شکل زیر خلاصه می‌شود:

$$A_P\times\psi_E^{t+dt}+B_P\times\psi_N^{t+dt}+C_P\times\psi_p^{t+dt}+D_P\times\psi_w^{t+dt}=F_P \qquad (۱۰)$$

$$A_P=\phi K(\psi)_e\frac{dy\,dt}{2\delta x_e}$$

$$B_P=\phi K(\psi)_n\frac{dx\,dt}{\delta y_n}$$

$$D_P=\phi K(\psi)_w\frac{dy\,dt}{2\delta x_n}$$

$$C_P=-(A_P+B_P+D_P)-0.5\times f(\psi)dx\,dy$$

$$\begin{aligned}F_P=&-K(\psi)_n dx\,dt-0.5\times f(\psi)dx\,dy\,\psi_p^t\\&-(1-\phi)K(\psi)_e\frac{dy\,dt}{2\delta x_e}(\psi_E^t-\psi_P^t)\\&+(1-\phi)K(\psi)_w\frac{dy\,dt}{2\delta x_w}(\psi_P^t-\psi_W^t)\\&-(1-\phi)K(\psi)_n\frac{dx\,dt}{\delta y_n}(\psi_N^t-\psi_P^t)\end{aligned}$$

برای تمام گره ها روی سطح زمین (مرز AB) شرط گرادیان فشار مشخص در جهت عمودی ($\frac{\partial\psi}{\partial y}=\frac{I}{K_y(\psi)}-1$) برقرار است که (I) شدت آبیاری می‌باشد. از اینرو معادله جبری عمومی (رابطه ۷) برای نقاط روی سطح زمین به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$A_P\times\psi_E^{t+dt}+C_P\times\psi_p^{t+dt}+D_P\times\psi_w^{t+dt}+E_P\times\psi_S^{t+dt}=F_P \qquad (۱۱)$$

$$A_P=\phi K(\psi)_e\frac{dy\,dt}{2\delta x_e}\ ,$$

$$D_P=\phi K(\psi)_w\frac{dy\,dt}{2\delta x_w}$$

$$E_P=\phi K(\psi)_S\frac{dx\,dt}{\delta y_s}$$

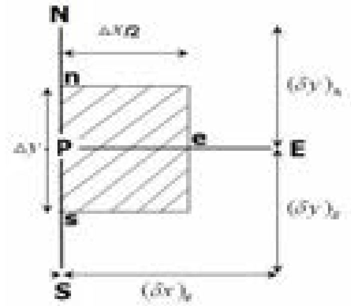
$$C_P=-(A_P+D_P+E_P)-0.5\times f(\psi)dx\,dy$$

$$\begin{aligned}F_P=&\,K(\psi)_S dx\,dt-0.5\times f(\psi)dx\,dy\,\psi_p^t\\&-(1-\phi)K(\psi)_e\frac{dy\,dt}{2\delta x_e}(\psi_E^t-\psi_P^t)\\&+(1-\phi)K(\psi)_w\frac{dy\,dt}{2\delta x_w}(\psi_P^t-\psi_W^t)\\&-(1-\phi)K(\psi)_n\frac{dx\,dt}{\delta y_n}(\psi_N^t-\psi_P^t)-I\,dx\,dt\end{aligned}$$

مرزهای EC و ED مرزهای با پتانسیل فشاری (ψ) مشخص هستند. پتانسیل فشاری در گره‌های E و F با توجه به اینکه محل زهکش هستند برابر فشار آزاد و صفر در نظر گرفته می‌شود. برای سایر نقاط زیر مرزها پتانسیل فشاری برابر با فاصله گره تا محل زهکش می‌باشد.

تعیین دبی تخلیه زهکشی

با منفصل نمودن رابطه ۱ بر گره منطبق بر محل زهکش (نقطه E در شکل ۲و نقطه P در حجم کنترل شکل ۳) و با علم به این نکته که مقدار پتانسیل فشاری در آن گره برابر با صفر است دبی خروجی از زهکش محاسبه می‌شود:



شکل ۳- حجم کنترل مربوط به نقطهP منطبق بر محل زهکش

$$
\begin{aligned}
q_s = {} & A'_P \phi \psi_E^{t+dt} + A'_P (1-\phi)\psi_E^{t} \\
& + B'_p \phi \times \psi_N^{t+dt} + B'_p (1-\phi)\psi_N^{t} \\
& + E'_P \phi \times \psi_S^{t+dt} + E'_p (1-\phi)\psi_S^{t} \\
& + B'_p dy + E'_p dy
\end{aligned}
\qquad (۱۲)
$$

$$A'_p = K(\psi)_e \frac{dy\, dt}{\delta x_e}$$

$$B'_P = K(\psi)_n \frac{dx\, dt}{2\delta y_n}$$

$$E'_p = K(\psi)_S \frac{dx\, dt}{2\delta y_s}$$

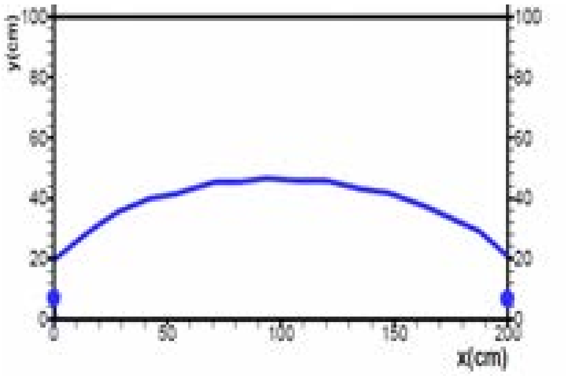
نتایج و بحث

صحت سنجی مدل

به منظور صحت سنجی مدل تهیه شده در این تحقیق نتایج آن با نتایج مدل SEEP 2D در دو مورد (CASE I و CASE II) مقایسه شد. مدل SEEP 2D یکی از مدل‌های مشهور در خصوص شبیه سازی جریان ماندگار در خاک اشباع و غیراشباع می‌باشد. مدل مذکور که در بسته نرم افزارهای GMS موجود است برای محاسبه هدایت هیدرولیکی غیراشباع از رابطه ون گنختون ۱۹۸۰ استفاده می‌کند و در آن معادله ریچاردز به روش عناصر محدود [1] حل می‌شود.

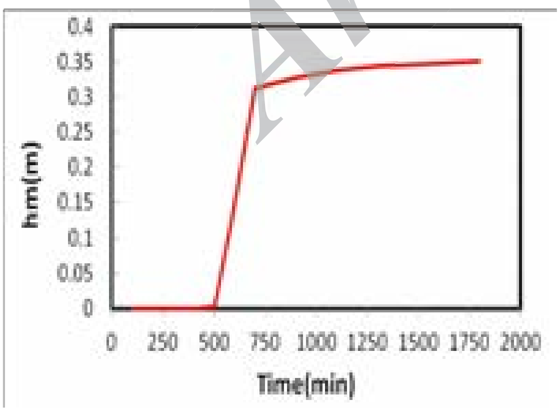
محدوده مورد مطالعه در CASE I در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود توده خاک دارای پهنای ۲ متر و ارتفاع یک متر است و۹۰ زهکش ها در عمق ۹۰ سانتی متری از سطح زمین نصب شده اند.

محدوده مورد مطالعه نهایتا بصورت یک شبکه ۵ در ۵ سانتی متر شبکه بندی شد. گام زمانی محاسبات ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شد. به منظور تعیین شبکه بهینه اندازه شبکه از درشت (۱۰ در ۱۰ سانتی متر) به ریز (۱ در ۱ سانتی متر) تغییر داده شد و موقعیت تراز آب زیرزمینی بین دو زهکش مقایسه شد.



شکل ٤- محدوده مورد مطالعه در CASE I

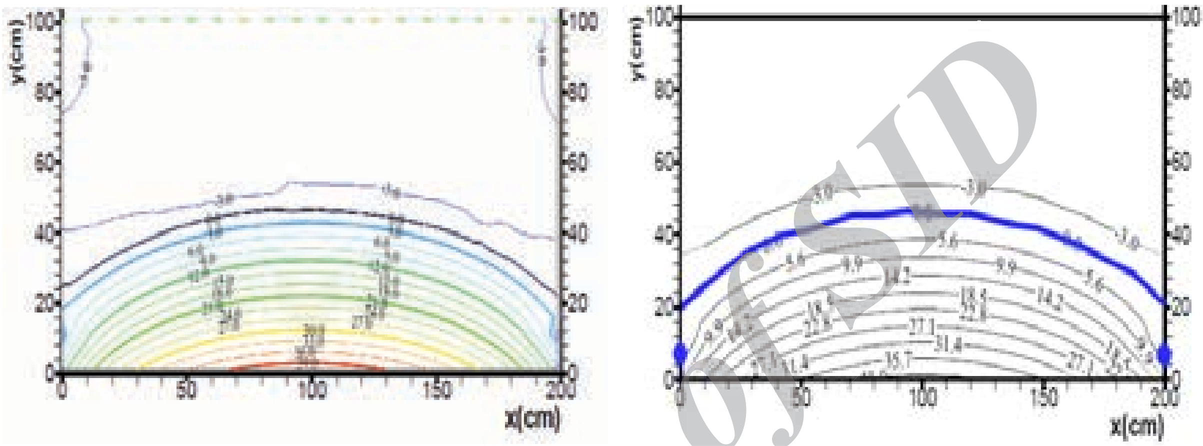
نتایج نشان داد ریزتر کردن شبکه از ۵ در ۵ سانتی متر نتایج تغییر چندانی نداشت (حداکثر اختلاف کمتر از ۲ درصد) بنابراین اندازه شبکه ۵ در ۵ سانتی متر به عنوان شبکه بهینه انتخاب شد. هدایت هیدرولیکی اشباع در دو جهت x وy یکسان و برابر ۰/۰۰۱ سانتی متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین پارامترهای ون گنختون n و α به ترتیب ۱/۲۵ و ۰/۰۳برای مدل معرفی شد. رطوبت اشباع ۰/۵۰۱ . رطوبت باقیمانده ۰/۰۱۵ می‌باشد. شدت بارندگی ۰/۰۰۰۱۷ سانتی متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است سطح اولیه آب زیر زمینی در فاصله ۹۰ سانتی متری از سطح زمین برابر با عمق نصب زه کش ها قرار دارد. در شکل ۵ تغییرات حداکثر رقوم سطح آب زیر زمینی نسبت به محور زهکش ها نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود بعد از حدود ۱۲۵۰ دقیقه نوسانات سطح آب بین دو زهکش به حالت تعادل نسبی رسیده است (تغییرات سطح آب به کمتر از ۵ درصد رسیده باشد). حداکثر رقوم سطح آب در این حالت ۰/۳۵ متر بالاتر از محور زهکش ها می‌باشد.



شکل۵- تغییرات وابسته به زمان حداکثر تراز آب زیرزمینی بین دو زهکش نسبت به محور زهکش ها(CASE I)

1- Finite element

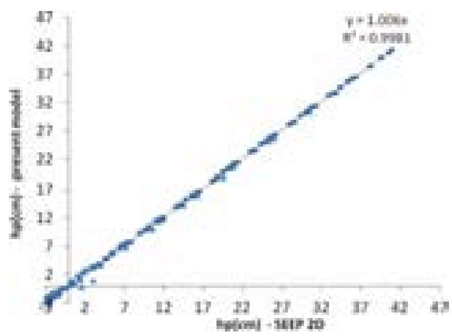
در شکل ۶ خطوط هم فشار محاسبه شده بعد از به تعادل رسیدن توسط مدل حاضر (مدل غیرماندگار) با نتایج مدل SEEP2D (مدل ماندگار) مقایسه شده است. لازم به ذکر است که مدل تهیه شده در این تحقیق غیرماندگار است و نتایج آن برای شرایط به تعادل رسیدن با نتایج مدل ماندگار SEEP2D مقایسه شده است. بعد از به تعادل رسیدن تغییرات وابسته به زمان مشاهده نمی شود و همانند این است که سمت چپ رابطه ۱ برابر با صفر در نظر گرفته شود. در این حالت مدل غیرماندگار همانند مدل ماندگار رفتار می‌کند و نتایج آنها با هم قابل مقایسه است. خط هم فشار صفر نشان دهنده سطح ایستابی بین دو زهکش است. همانگونه که مشاهده می‌شود هر دو مدل ناحیه غیراشباع با پتانسیل ماتریک ۳- سانتی متر را در بالای سطح ایستابی نشان می‌دهند. پتانسیل ماتریک بالای سطح ایستابی نشان دهنده وجود ناحیه غیراشباع می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار فشار حدود ۴۰ سانتی متر برآورد شده است که درموقعیت x=۱۰۰ و y=۰ سانتی متر می‌باشد. تقارن منحنی ها نسبت به خط مرکزی محدوده نشان از دقت مدل در برآورد مقادیر پتانسیل فشاری و ماتریک دارد. بطور کلی نتایج دو مدل در حالت ماندگار کاملاً مشابه هستند.



الف ب

شکل ٦- خطوط هم فشار محاسبه شده توسط الف) مدل حاضر ب) مدل SEEP 2D در CASE I

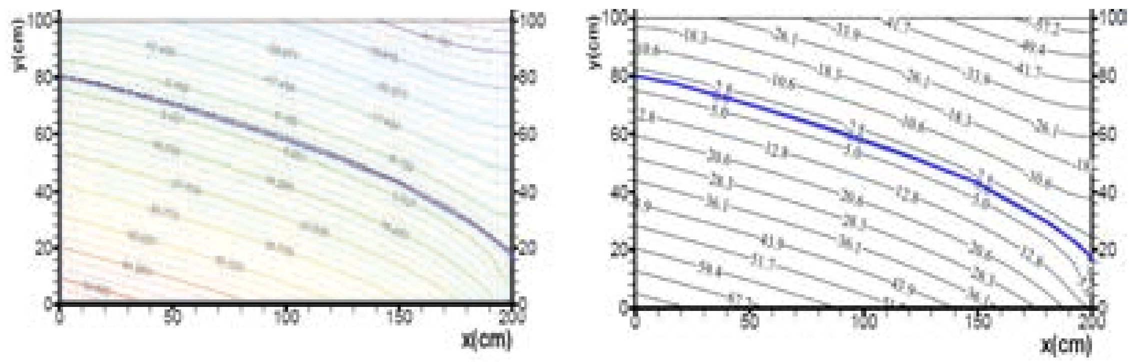
به منظور مقایسه بهتر مقادیر پتانسیل فشاری و ماتریک در نقاط متناظر توسط دو مدل در شکل ۷ در مقابل هم ترسیم شده اند. ضریب زاویه خط عبور کرده از بین نقاط ۱/۰۰۶ و ضریب تعیین بسیار نزدیک به یک نشان دهنده دقت مدل حاضر در شبیه سازی جریان دو بعدی در توده خاک مذکور می‌باشد.



شکل۷- مقادیر پتانسیل فشاری محاسبه در نقاط متناظر CASE I

همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است محدوده مورد مطالعه در CASE II همان توده خاکCASE I است که بین دو مخزن آب قرار دارد. مخزن بالادست دارای عمق ۸۰ سانتی متر و مخزن پایین دست عمق ۱۰ سانتی متر دارد. همچنین تزریق توسط بارندگی وجود ندارد.

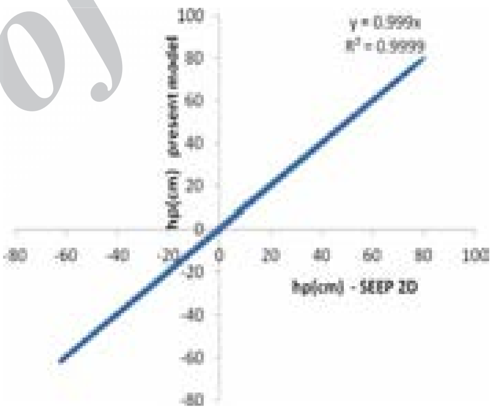
خطوط هم فشار محاسبه شده در هر دو مدل در شکل ۸ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود خط نشت آزاد (خط هم فشار صفر) از ۸۰ سانتی متر در سمت چپ شروع و در رقوم ۱۹/۸ سانتی متر سمت راست از توده خاک خارج می‌شود. فاصله سطح آب مخزن پایین دست (رقوم ۱۰ سانتی متر) تا نقطه خروج خط نشت (رقوم ۱۹/۸ سانتی متر) سطح تراوش نامیده می‌شود که در هر دو مدل یکسان است. کلمنت و همکاران (۸) ضمن شبیه سازی جریان اشباع- غیراشباع به سمت زهکش ها با روش تفاضل محدود بیان کردند که طول سطح تراوش تابعی از نیروی موئینگی در ناحیه غیراشباع است. هر دو مدل موقعیت خط نشت آزاد را و هم چنین مقادیر پتانسیل ماتریک ناحیه غیراشباع و مقادیر فشار ناحیه اشباع را با دقت بسیار بالایی نزدیک به هم محاسبه می‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که روش احجام محدود در صورت انتخاب گام‌های مکانی و زمانی مناسب همان دقت روش المان‌های محدود را دارد.



ب الف

شکل ۸- خطوط هم فشار محاسبه شده الف) توسط مدل حاضر ب) توسط مدل SEEP 2D در CASE II

به منظور مقایسه کمی مقادیر پتانسیل فشاری و ماتریک در نقاط متناظر توسط دو مدل در شکل ۹ در مقابل هم ترسیم شده اند. ضریب زاویه خط عبور کرده از بین نقاط ۰/۹۹۹ و ضریب تعیین بسیار نزدیک به یک نشان دهنده دقت مدل حاضر در شبیه سازی جریان دو بعدی در توده خاک مربوط به CASE II می‌باشد.



شکل۹- مقادیر پتانسیل فشاری محاسبه در نقاط متناظرا CASE I

بررسی نوسانات سطح ایستابی و دبی زهکشی

پس از صحت سنجی مدل و اطمینان از نتایج آن به بررسی نوسانات سطح ایستابی و دبی زهکشی در محدود مورد مطالعه این تحقیق (نشان داده شده در شکل۲) پرداخته شد. مشخصات خاک محدوده مورد مطالعه مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول۱- مشخصات خاک محدوده مورد مطالعه

n	α(1/cm)	K_S(m/day)	θ_S	θ_r
۱/۲۳۴	۰/۰۲۱	۱۵/۲	۰/۵۰۱	۰/۰۱۵

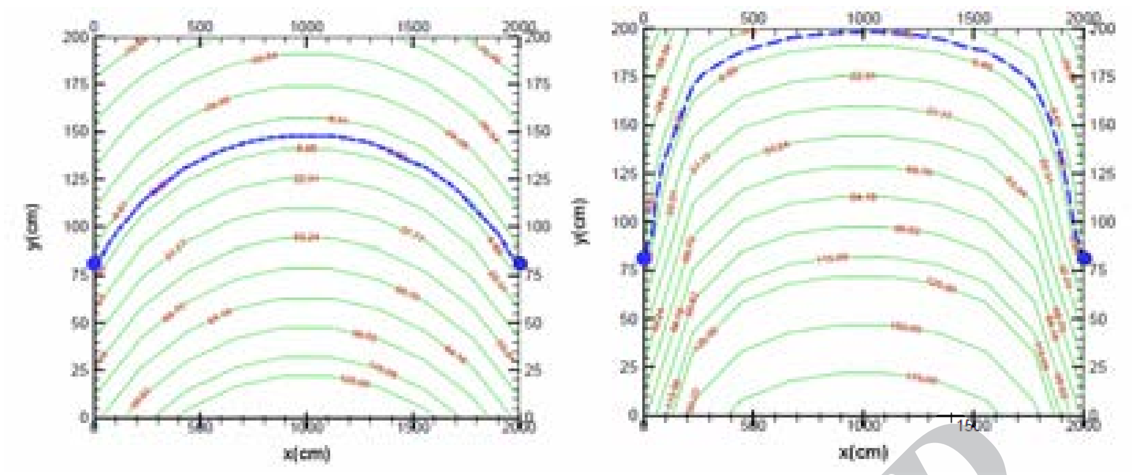
همانگونه که قبلا اشاره شد سطح ایستابی در ابتدا در سطح زمین طبیعی قرار دارد. با نصب دو زهکش در عمق ۱/۲ متری عملیات زهکشی انجام شد. در شکل ۱۰ سطح ایستابی و منحنی‌های هم پتانسیل فشاری/ ماتریک ۳ ساعت و ۱۰ روز پس از شروع زهکشی را نشان می‌دهد. منحنی نقطه چین موقعیت سطح ایستابی را نشان می‌دهد که کاملا نسبت به خط مرکزی بین دو زهکش تقارن دارد.

همانگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است با افت سطح ایستابی مقادیر پتانسیل ماتریک در یک نقطه مشخص بالای سطح ایستابی نسبت به زمان افزایش می‌یابد که نشان دهنده کاهش رطوبت حجمی نیز می‌باشد. همانگونه که انتظار می‌رفت در یک نقطه مشخص زیر سطح ایستابی پتانسیل فشاری با افت سطح ایستابی کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۱ الف موقعیت سطح ایستابی در طی ۳۰ روز زهکشی را نشان داده شده است. در ابتدا سطح ایستابی با شدت بیشتر سپس به آرامی کاهش می‌یابد.

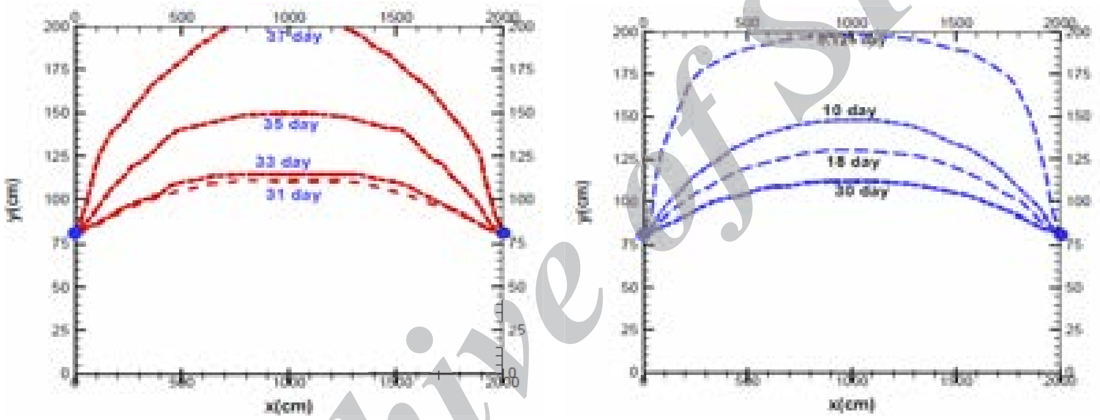
در قدم بعدی پس از ۳۰ روز زهکشی و افت سطح ایستابی به مدت ۷ روز تغذیه از سطح خاک به شدت ۰/۰۰۰۰۱ سانتی متر بر ثانیه انجام شد. در این شرایط همانگونه که در شکل (۱۱- ب) نشان داده شده است سطح ایستابی شروع به بالا آمدن می‌کند. در ابتدا به آرامی و سپس با شدت بیشر بالا می‌آید.

با استفاده از رابطه ۱۲ دبی زهکش ها در طی ۳۷ روز محاسبه گردید. تغییرات دبی زهکش در مقابل زمان در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در طی مدت تخلیه از روز اول تا روز سی ام دبی تخلیه به سرعت شروع به کاهش می‌کند تا اینکه تغییرات آن تقریبا ثابت می‌شود. نکته قابل توجه آن است که پس از شروع تغذیه بلافاصله دبی زهکش افزایش نمی یابد بلکه با تاخیری همراه است. در این مطالعه زمان تاخیر حدود ۳/۱۲۵ روز می‌باشد (از روز ۳۰ تا ۳۳/۱۲۵).



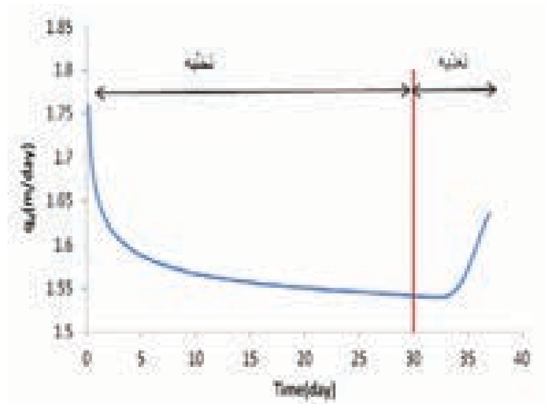
ب الف

شکل ۱۰- خطوط هم پتاسیل فشاری الف) ۳ ساعت ب) ۱۰ روز بعد از زهکشی



شکل ۱۱- الف)پایین افتادگی سطح ایستابی در مدت ۳۰ روز زهکشی ب) بالا آمدگی سطح ایستابی در مدت ۷ روز تغذیه (از روز ۳۰ تا ۳۷)

این تاخیر بدین دلیل است که مدت زمانی طول می‌کشد که ناحیه غیراشباع بالای سطح ایستابی شروع به اشباع شدن کند و جریان ورودی باعث افزایش دبی زهکش ها شود.



شکل ۱۲- تغییرات وابسته به زمان دبی تخلیه در فاز تغذیه و تخلیه

نتیجه گیری

در این تحقیق مدلی ریاضی تهیه شد که به منظور شبیه سازی جریان آب در خاک اشباع و غیراشباع معادله ریچاردز را برای حالت دو بعدی به روش عددی حجم کنترل حل می‌کند. روش منفصل سازی معادله دیفرانسیل روش کرنک- نیکلسون می‌باشد. دستگاه معادلات حاکم به روش تکراری حل شد و مقادیر پتانسیل فشاری یا ماتریک در گره مرکزی هریک از احجام کنترل بدست آمد. ارتباط هدایت هیدرولیکی غیراشباع و هد فشار با استفاده از رابطه ون گنوختن به مدل معرفی شد

صحت سنجی مدل عددی با دو مثال موردی انجام شد. در مورد اول موقعیت سطح ایستابی بین دو زهکش بعد از به تعادل رسیدن با سطح ایستابی محاسبه شده توسط مدل SEEP2D مقایسه شد. نتایج نشان داد که سطح ایستابی محاسبه شده در هر دو مدل بر هم منطبق هستند. در مورد دوم جریان از میان توده خاکی بین دو مخزن

آب شبیه سازی گردید. در این حالت نیز موقعیت خط نـشت آزاد بـین دو مخزن محاسبه شده توسط دو مدل کاملا یکسان بود. نتایج این دو مورد نشان داد با وجود اینکه مدل نوشته شده در این تحقیـق از روش عددی حجم محدود برای حـل معادلـه غیرمانـدگار ریچـاردز اسـتفاده می‌کند ولی نتایج حالت تعادل آن با نتایج مدل ماندگار SEEP2D که از روش المان‌های محدود استفاده می‌کند کاملا تطابق دارد.

پس از صحت سنجی چگو نگی نوسانات سـطح ایـستابی و دبـی زهکشی در یک توده خاک نشان داده شده در شـکل ۲ بررسـی شـد. نتایج تحقیق نشان داد:

۱- با افت سطح ایستابی مقادیر پتانسیل ماتریـک در یـک نقطـه مشخص بالای سطح ایستابی نسبت به زمـان افـزایش مـی‌یابـد کـه نشان دهنده کاهش رطوبت حجمی نسبت به زمان در نقطـه مـذکور است.

۲- در شرایط بدون تغذیه سـرعت افـت سـطح ایـستابی در ابتـدا خیلی شدید و در ادامه به آرامی رخ می‌دهد.

۳- دبی خروجی از زهکش هماننـد افـت سـطح ایـستابی خیلـی سریع کاهش می‌یابد و در ادامه بـا تغییـرات خیلـی کمتـر بـه آرامـی کاهش می‌یابد.

۴- دبی خروجی از زهکش بلافاصله بعد از تغذیه از سطح زمـین افزایش نمی یابد بلکه با تاخیر رخ می‌دهد. در مثـال مـورد نظـر ایـن تحقیق زمان تاخیر حدود ۳/۱۲۵ روز بود.

منابع

۱- بهبهانی س.م.ر.، و رحیمی خوب ع. ۱۳۸۱. شبیه سازی جریان ناپایدار دو بعدی آب بطرف زهکش ها. مجله علوم کـشاورزی و منـابع طبیعـی، سال نهم، شماره اول. صفحات ۱۶۲ تا ۱۶۷.

۲- شایان نژاد م. ۱۳۸۷. اصول طراحی سیستم‌های زهکشی. انتشارات دانشگاه شهر کرد،۲۵۶ صفحه.

۳- جعفری ج.، ناظمی ا.ح.، صدرالدینی س.ع. و افروزی ع. ۱۳۹۲. اندازه گیری و برآورد تراز سطح ایـستابی و میـزان تخلیـه زهکـشی در جریـان غیرماندگار. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ۳، شماره ۱۱، صفحات ۱۱۵ تا۱۲۵.

۴- فرهادی ل.، و آشتیانی ب. ۱۳۸۴. تحلیل عددی معادله جریان آب در ناحیه غیراشباع. مجله تحقیقات منابع آب ایران. جلد ۱ شماره ۱، صفحات ۲۹تا ۳۹.

۵- عزیزی پور م.، و محمودیان شوشتری م. ۱۳۹۱. حل عددی معادله ریچاردز در جریان غیراشباع با استفاده از روش حجم محدود. مجله علـوم و مهندسی آبیاری، جلد ۳۵ شماره ۲، تابستان ۹۱، صفحه ۶۵ تا ۷۲.

۶- نوری ح.، لیاقت ع.، پارسی نژاد م.، و وظیفه دوست م. ۱۳۸۹ . ارزیابی مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP در بـرآورد نوسـانات سـطح ایـستابی و شدت جریان زهکشی زیرزمینی. مجله دانش آب و خاک، سال بیستم، شماره ۲، صفحات ۱۵۷ تا ۱۷۲.

7- Brooks R.H. and Corey A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media.Hydrol. Pap. 3, Colo. State Univ., Fort Collins.

8- Clement T.P., William R.W. and Fred J.M. 1994. A physically based, two-dimensional, finite-difference algorithm for modeling variably saturated flow, Journal of Hydrology, 161: 71-90

9- Leij F.J., Russel W.B. and Lesch S.M. 1997. Closedform expressions for water retention and conductivity data. Ground water, 35:848-858.

10- Menziani M., Pugnaghi S. and Vincenzi S. 2007. Analytical solutions of the linearized Richards' equation for discrete arbitrary initial and boundary conditions. Journal of Hydrology, 332:214-225.

11- Mualem Y. 1976. A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils. Research Project Report , No. 442, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa.

12- Samani J.M.V., and Fathi P. 2009. Estimation of unsaturated soil hydrodynamic parameters using inverse problem technique, J. Agric. Sci. Technol, 11: 199-210

13- Simpson M.J. and Clement T.P. 2003.Comparison of finite difference and finite element solutions to the variably-saturated flow equation, Journal of Hydrology, 270: 49-64

14- Van Genuchten M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 44(5):892-898

15- Versteeg H.K., Malalasekera W. 1995. An introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method. Longman Group Ltd. P, 255.

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 3, Jul.-Agu. 2014, p. 546-555

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۳، ص. ۵۵۵-۵۴۶

Numerical Simulation of Saturated-unsaturated 2D- unsteady Flow Toward Drain Using Finite Volume Method

R. Ghobadian[1]
Received:05-01-2014
Accepted:23-06-2014

Abstract

To drainage design and management it is necessary water flow toward drain, water table variation between drains and drainage discharge have been simulated. With recent development in numerical method, it is possible the none-linear differential equation governing saturated-unsaturated flow in soil is numerically solved. In this study a computer model has been developed in which two dimensional equation of saturated-unsaturated flow in soil is solved using finite volume method and Crank-Nicolson scheme. The soil hydrodynamic properties function and soil moisture characteristic curve proposed by Van Genuchten were employed. The result of model calibration revealed that the recent finite volume method endorse the result of finite element models. After model calibration and evaluation, water table variation between two drains with 20 m distance and installation depth of 1.2 m was simulated. The result showed during discharge phase water table falls very fast at the first and then falling speed reduces until reach a constant value. During recharge phase water table raises very low at the first and then rising speed increase. Drainage discharge has similar behavior same as water table. Drainage discharge has a lag time related to time that recharge begins. In this study the lag time was 3.125 day.

Keywords: Drainage discharge, Richards' equation, Finite volume method, Crank-Nicolson scheme, Van Genuchten equation

1-Associate Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
Email:rsghobadian@gmail.com