

شبیه‌سازی حرکت برومید در ستون‌های دست‌خورده خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D

• حسین شیرانی

استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان (نویسنده مسئول)

• مجتبی کرد

کارشناس ارشد دفتر فنی شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران

• غلام عباس صیاد

استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز

• هرمزد نقوی

استادیار بخش تحقیقات خاک و آب کرمان

تاریخ دریافت: بهمن ماه ۱۳۸۷ تاریخ پذیرش: بهمن ماه ۱۳۸۹

تلفن تماس نویسنده مسئول: ۰۹۱۳۳۱۹۲۱۱۵

Email: shirrani279@yahoo.com

چکیده

مطالعه حرکت آنیون‌ها در خاک به دلیل آبشویی سریع و عدم جذب توسط ذرات خاک و رسیدن به آب‌های زیرزمینی، اهمیت ویژه‌ای دارد. برومید از جمله یون‌هایی است که به راحتی شسته شده و به دلیل این خاصیت، به عنوان ردیاب حرکت آب و املاح در خاک مورد توجه قرار گرفته است. لذا این تحقیق به منظور شبیه‌سازی حرکت یون برومید در ستون‌های دست‌خورده خاک (۱۰ سانتی‌متر قطر و ۲۵ سانتی‌متر ارتفاع) در دو بافت شن لومی و لوم شنی توسط مدل HYDRUS-1D انجام شد. یون برومید (از منبع برومید پنتاسیم) در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و در ۶ تکرار به ستون‌های خاک جهت آزمایش آبشویی اضافه گردید. آبشویی برومید تا ۴ حجم خلل و فرج انجام و غلظت برومید در زه آب خروجی اندازه‌گیری شد. انتقال برومید در خاک لوم شنی آهسته‌تر از خاک شن لومی بود. آنالیز حساسیت مدل نشان داد، کمترین تأثیر مربوط به ضریب پخشیدگی در آب بود که افزایش میزان آن، حداقل تأثیر را بر غلظت پیش‌بینی شده زه آب خروجی خاک‌های مورد مطالعه داشت. در حالی که مدل بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات رطوبت اشباع نشان داد. مدل HYDRUS-1D پیش‌بینی خوبی از غلظت برومید در زه آب نشان داد (ضریب تبیین بیشتر از ۹۰ درصد). معادله NECDE (معادله جریان روان-پخشیدگی غیر تعادلی) پیش‌بینی بهتری از حرکت برومید در خاک نسبت به معادله CDE (معادله جریان روان-پخشیدگی) نشان داد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، برومید، مدل هایدروس ۱ بعدی (HYDRUS-1D)، آبشویی

Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) No 92 pp: 20-31

Simulating bromide transport in disturbed soil columns using HYDRUS-1D model

By: Hossein Shirani, Assit. Prof., Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Tchucplcp."Tchucplcp.ktcp" *Eqttgurqpfkpi" Cwvjqt="Vgn<" - ; : 3573; 4337+ "Oqlvcdc" Mqt f." Oue." Vgejpkecn" QhLeg" qh" Water Research Management Company, Tehran, Iran. Gholam Abbas Sayyad, Assit. Prof., Department of Soil Science, College of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Hormazd Naghavi, Assit. Prof., Department Soil and Water Research, Kerman Agriculture and Natural Resource Research Center, Kerman, Iran.

The study of anion transport toward groundwater is very important since these ions are not adsorbed to the soil particles and leach easily from the soil profile. Bromide is one of the anions which has been considered as a tracer for water and solute transport through the soil. This study was conducted to simulate bromide transport in disturbed soil columns (10 cm in diameter and 25 cm in height) using HYDRUS-1D software. Treatments included soil texture (sandy loam and loamy sand) and rate of bromide application (10, 20 and 30 mg kg⁻¹) with six replications. Bromide was applied in the form of potassium bromide. Leaching of Bromide was conducted for 4 pore volume and its concentration was measured in drained water. Bromide transport was slower in sandy loam soil compared to loamy sand. Sensitivity analysis showed that D_w (ion diffusion coefficient in water) and θ_s (saturated water content) had the least and the greatest impact on model predictions, respectively. Bromide concentrations in discharge were well predicted using HYDRUS-1D model ($R^2 > 90\%$). Non-equilibrium convection-dispersion equation (NECDE) in HYDRUS-1D produced much reasonable calibration and test results than CDE equation.

Keywords: Simulation, Bromide, Leaching, HYDRUS-1D model.

مقدمه

با تبدیل شدن آلودگی خاک به یک مشکل زیست محیطی، اهمیت پیش بینی جریان آب در منطقه غیر اشباع به طور روزافزونی در حال گسترش است. واضح است که باید نقش منطقه غیر اشباع، به صورت محل نابودی و یا تولید، برای ارزیابی آلودگی آب های زیرزمینی و نیز انتخاب روش های اصلاحی به طور دقیق بررسی گردد. برای این منظور استفاده از مدل های کامپیوتری می تواند مفید باشد (۴).

اصلاح موجود در خاک یا آنهایی که به خاک اضافه می شوند، درگیر واکنش های متفاوتی مانند رسوب، جذب سطحی، جذب به وسیله گیاهان و یا انتقال در خاک می گردند. انتقال املاح در خاک به سه طریق انجام می گیرد که شامل جریان روان (توده ای)، پخشیدگی^۱ و انتشار^۲ است. در جریان روان، انتقال املاح همراه محلول خاک صورت می گیرد. این شکل انتقال در مواردی که سرعت جریان محلول خاک و حلالیت املاح بالاست، قسمت عمده انتقال را شامل می شود. در مکانیسم پخشیدگی، املاح از محلی که غلظت بیشتری دارد به محلی که غلظت کمتری دارد انتقال می یابند و عامل این حرکت شیب غلظت می باشد. در مکانیسم انتشار، اختلاف سرعت مکانی املاح، سبب پراکنش می گردد. بنابراین پراکنش فقط موقعی موثر است که محلول خاک در حرکت باشد، در حالی که پخشیدگی در حالت سکون نیز انجام می شود (۱، ۲). آنیون های معمول در خاک به دلیل اهمیت آن ها از نظر شوری، حاصلخیزی و آلودگی آب های زیرزمینی دارای اهمیت خاص خود هستند. غیر فعال بودن اکثر آنیون ها و عدم جذب آن ها بر روی مکان های جذب در خاک بر اهمیت مطالعه آن ها افزوده است. چون به راحتی می توانند با کمی آبشویی از پروفیل خاک شسته شده و وارد

آب های زیرزمینی گردند (۲).

برومید از جمله یون هائی است که به راحتی شسته شده و به دلیل این خاصیت، به عنوان ردیاب حرکت آب و املاح در خاک مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از برمید به عنوان ردیاب به این دلیل ارجحیت دارد که غلظت اولیه برمید در خاک های ایران (آنیون غالب کلر است) کم می باشد و باعث آلودگی خاک نمی شود. هم چنین در فرایندهای پیچیده شیمیایی و بیولوژیک مانند نیترات شرکت نمی کند و غلظت آن در خاک پس از نمونه برداری با زمان تغییر نمی کند (۶).

استفاده از مدل ها در پیش بینی حرکت املاح و آلاینده ها در خاک، می تواند موجب صرفه جویی زیاد در وقت و هزینه ها گردد. ولی این پیش بینی زمانی مفید و کاربردی است که دقت و اعتبار مدل در این برآورد، ابتدا بررسی شده باشد. بنابراین، قبل از استفاده از این مدل ها، باید کارایی آن ها در شرایط کنترل شده ارزیابی گردد. بدین معنی که ابتدا با توجه داده های مشاهده ای، پارامترهای مدل بهینه می گردند که نیاز به شرایط کنترل شده دارد. لذا انجام تحقیقات در زمینه ارزیابی مدل ها و انتخاب مدل مناسب و هم چنین بهینه سازی پارامترهای مدل در شرایط دقیق آزمایشگاهی و کنترل شده، قبل از استفاده از آن در شرایط طبیعی، امری ضروری محسوب می شود.

مدل نرم افزاری HYDRUS-1D به منظور شبیه سازی یک بعدی حرکت آب، حرارت و املاح در محیط متخلخل و شرایط مختلف رطوبتی ایجاد شده و توسعه یافته است. این مدل برای توضیح حرکت آب و املاح به ترتیب از معادلات ریچارد و جریان روان - پخشیدگی استفاده می کند. هم چنین، کلیه فرایندهای جذب آب توسط ریشه، شرایط مختلف اولیه،

عناصر را در خاک در شرایط مختلف مدیریتی تعیین کرد که هم از نظر زمان و هم از نظر هزینه، صرفه جویی خواهد شد. مطالعه انتقال آب و املاح به خصوص در شرایط ایران که به طور معمول زارعین از مقادیر زیاد کود به خصوص کودهای نیتروژنه (که به راحتی در خاک انتقال می یابد) و آبیاری سنگین با راندمان کم استفاده می کنند، بسیار ضرورت دارد. در حقیقت کشاورزان با این کار موجبات انتقال سریع املاح در خاک و آلودگی آب های زیرزمینی را فراهم می سازند.

هدف از انجام این تحقیق، شبیه سازی حرکت یون برومید در ستون های دست خورده خاک در دو بافت شن لومی و لوم شنی توسط مدل HYDRUS-1D بود.

مواد و روش ها

در این مطالعه، حرکت برومید در شرایط آزمایشگاه، مورد بررسی قرار گرفته و مدل سازی گردید. ابتدا اطلاعات و داده های مربوط به اندازه گیری حرکت برومید جمع آوری شد و سپس پارامترهای لازم برای شبیه سازی حرکت املاح اندازه گیری شده و در نهایت با راه اندازی و اجرای مدل ها بر مبنای پارامترهای ورودی، میزان حرکت برومید برآورد شده و با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه گردید.

روش اجرا

در این تحقیق از دو نوع خاک با بافت شن لومی و لوم شنی که از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متری تهیه شده بودند، استفاده گردید. به طوری که پس از خشک نمودن نمونه ها، آن ها را از الک ۲ میلی متری عبور داده و ۳۶ ستون آماده شده با آن ها پر گردید. ارتفاع ستون های خاک مورد استفاده برای انجام آزمایش ۲۵ سانتی متر بود که در زیر ستون ها ۵ سانتی متر فیلتر شنی برای جلوگیری از خروج خاک از انتهای ستون قرار داده شد. بنابراین با توجه به حجم ستون ها و چگالی ظاهری خاک در مزرعه، مقدار خاک لازم برای پر کردن ستون ها به نحوی که چگالی ظاهری به مقدار آن در مزرعه برسد، محاسبه گردید. بدین ترتیب که پس از محاسبه مقدار خاک خشک، با توجه به حجم ستون ها (سطح مقطع \times ارتفاع ستون خاک) و جرم مخصوص ظاهری در مزرعه، این مقدار خاک محاسبه شده در چند مرحله (لایه) به ستون ها اضافه شد و در هر مرحله خاک به طور ملایم و یکسان توسط یک وزنه فشرده گردید. سپس آخرین لایه در ستون ریخته شد و با فشار ملایم به ارتفاع مورد نظر (۲۵ سانتی متر) رسانده شد. برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. در این تحقیق، بافت خاک به روش پی پت (۱۳)، جرم مخصوص ظاهری به روش استونه (۱۴)، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (۱۳)، pH خاک به وسیله الکتروود شیشه ای، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع به وسیله دستگاه EC متر (۱۴) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (۱۴) تعیین گردیدند. لازم به ذکر است، تمامی خصوصیات مورد نظر برای هر خاک در سه تکرار اندازه گیری شدند. سطح تیمارهای برومید ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم وزن خاک خشک بود. انتخاب این مقادیر بر اساس مقادیر موجود در مطالعات قبلی و به منظور آزمون توانایی مدل برای شبیه سازی حرکت برومید در خاک در شرایط وجود پالس های مختلف ورودی برومید به خاک انجام شد

مرز ورودی و خروجی آب و املاح در این مدل در نظر گرفته می شود. در مدل HYDRUS-1D فرض بر این است که املاح می توانند در هر سه فاز جامد، مایع و گاز خاک وجود داشته باشند. هر فاز ضرایب تولید و نابودی مربوط به خود را دارد و برهم کنش بین جامد و مایع با معادلات غیر خطی غیر تعادلی و برهم کنش بین فازهای مایع و گاز به صورت خطی و آبی بیان می شوند (۱۹). در این مدل فرض می شود که املاح در فاز مایع در اثر فرایندهای جریان روان، پخشیدگی و انتشار، انتقال می یابند، در صورتی که در فاز گازی خاک، فقط فرایند پخشیدگی عامل انتقال است. Casey و Simunek (۹) حرکت هیدروکربن تری کلرواتیلن را در ستون خاک بررسی کرده و به وسیله نرم افزار HYDRUS پارامترهای مدل CDE^۴ (ضریب نابودی و سرعت واکنش) را به طور معکوس تخمین زدند. این ماده در خاک احیاء شده و طی چند مرحله تغییر شکل متوالی به ترکیبات دیگر تبدیل می شود و ترکیب نهایی قابل ردیابی اتیلن است. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن جذب غیر تعادلی نسبت به جذب تعادلی، باعث تخمین بهتر پارامترهای ضریب نابودی و سرعت واکنش می شود. ژاکس و همکاران (۱۱) مدل های HYDRUS-1D و PHREEQC را با هم ارتباط داده و برای شبیه سازی حرکت فلزات سنگین و دیگر مواد فعال در خاک استفاده کردند. ایشان نتایج آبشویی طولانی مدت فلزات سنگین (کادمیم، روی و سرب)، کاتیون های غالب خاک (آلومینیوم، کلسیم، سدیم، پتاسیم و منیزیم) و آنیون کلرید در یک ستون خاک اشباع آلوده شده و نیز یک پروفیل خاک غیر اشباع غیر همگن را شبیه سازی نمودند. نتایج نشان داد، مدل تلفیقی قابلیت استفاده در شرایط اشباع و غیر اشباع خاک را دارد.

Moradi و همکاران (۱۷) پروفیل کادمیم را در یک خاک آهکی تیمار شده با لجن فاضلاب پس از ۱۸۵ و ۶۱۷ روز با استفاده از مدل های HYDRUS و MACRO شبیه سازی کردند. نتایج نشان داد، هر دو مدل توانستند پروفیل کادمیم را شبیه سازی کنند، اگرچه مدل MACRO برآورد بهتری از مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه داشت. صیاد و همکاران (۳) حرکت کادمیم، سرب، روی و مس را تحت دو سیستم ریشه ای (گندم و گلرنگ) در یک خاک آهکی با استفاده از مدل HYDRUS-1D شبیه سازی نمودند. نتایج آن ها نشان داد که مدل HYDRUS-1D توانست برآورد خوبی از روند حرکت فلزات در خاک کلیه تیمارها انجام دهد، ولی مقادیر پارامترهای جذبی بهینه شده توسط آن، از میزان تعیین شده در آزمایشگاه بسیار کمتر بود. این مسئله نشان می دهد که مدل برای جبران در نظر نگرفتن جریان در خلل و فرج درشت خاک، مقدار پارامترهای جذب را به شدت کاهش می دهد تا بتواند حرکت بیشتر فلزات را در خاک شبیه سازی کند. Dousset و همکاران (۱۰) حرکت برومید را در دو خاک دست خورده و دست نخورده با دو مدل HYDRUS-1D در شرایط تعادلی و غیر تعادلی شبیه سازی نمودند و نتیجه گرفتند که حالت تعادلی برای خاک دست خورده و غیر تعادلی برای خاک دست نخورده برآورد بهتری نشان دادند. با توجه به مطالب فوق، اهمیت بررسی انتقال آب و آلاینده ها در خاک و نقش مهم مدل ها در این مطالعه مشخص می شود. در واقع برای بررسی عملی حرکت عناصر، نیاز به آزمایش های گسترده خاک به صورت مداوم است که مشکل، وقت گیر و پر هزینه است. بنابراین بسیار مطلوب است که بتوان با مدل هایی حرکت املاح را برآورد نمود. با داشتن مدل های مذکور می توان سرنوشت

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش

نوع یافت	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	ماده آلی (%)	تخلخل (%)	BD (g/cm ³)	Ks (cm/hr)	pH	EC (dS/m)	CEC (CMol/Kg)
لوم شنی	۱۹/۴	۲۹/۲۱	۵۹/۲۵	<۰/۵	۴۶/۸	۴۶/۸	۳/۹۶	۸/۲	۳/۱	۱۱/۴
شن لومی	۹/۵۶	۱۱/۵۳	۸۷/۹	<۰/۵	۴۴/۰	۴۴/۰	۴/۲۵	۸/۱	۳/۱	۱۰/۲

BD: جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)؛ Ks: هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (سانتی متر بر ساعت)؛ EC: قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی-زیمنس بر متر)؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بر کیلوگرم خاک)

به مقادیر اندازه گیری شده غلظت برومید در زه آب، پارامترهای حساس مدل (یعنی پارامترهایی که مدل به تغییر مقادیر آن‌ها حساس بوده و با تغییر آن‌ها، نتایج مدل تغییرات قابل توجهی پیدا می کند) نظیر ضریب پخشیدگی-پراکنش پذیری و نیز پارامترهای هیدرولیکی مثل رطوبت غیر متحرک، رطوبت اشباع و رطوبت باقی مانده با استفاده از روش معکوس بهینه گردیدند. در این روش فرض می شود که هر پارامتر، به طور یکسان در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است. حدهای حداکثر و حداقل این دامنه را می توان بر اساس تجربیات و یا آزمایش‌ها و اندازه گیری‌های انجام شده در مطالعات قبلی و یا از منابع علمی انتخاب نمود. با هر بار اجرای مدل، برنامه از دامنه مذکور نمونه برداری کرده و یک تابع هدف (خطای بین مقدار پیش بینی شده غلظت برومید در زه آب و مقدار واقعی) را برای هر ترکیب از نمونه‌های مذکور محاسبه می نماید. ترکیبی از مقادیر پارامترهای مدل که کمترین خطا را ایجاد کنند، به عنوان مقدار بهینه معرفی می شوند.

به منظور آنالیز حساسیت، کمیت پارامترهای مدل به مقدار ۲۵ تا ۵۰ درصد تغییر داده شدند و پارامترهایی که در اثر این تغییرات به میزان قابل توجهی نتایج مدل را تغییر دادند، مشخص گردیدند که عبارت بودند از: ضریب پخشیدگی، پراکنش پذیری، رطوبت غیر متحرک و رطوبت اشباع. پارامترهای مدل از قبیل ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل پارامترهای منحنی رطوبتی خاک و نیز پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks)، رطوبت باقی مانده (θ) و رطوبت اشباع (S) در مدل ون گنوختن - معلم، با استفاده از اطلاعات تجزیه مکانیکی خاک (بافت خاک) و اندازه گیری جرم مخصوص ظاهری به وسیله ی مدل Roseta پیش بینی گردیدند.

شرایط مرزی

معادله انتقال املاح یک معادله مشتق جزئی غیر خطی است که دارای دو متغیر مستقل زمان (t) و مکان (X) و یک متغیر وابسته غلظت (C) است. این نوع معادلات دارای جواب‌های زیادی هستند و برای این که جواب واحدی از آن‌ها به دست آید، باید شرایط اولیه و شرایط مرزی سیستم، تعریف شود (۲۰). در این تحقیق، با توجه به این که جریان آب (آبشویی) به صورت اشباع ماندگار اعمال گردید، فقط شرایط مرزی در ابتدا و انتهای ستون خاک تعریف شد. در مرز بالایی ستون، شرایط بار آبی ثابت در نظر گرفته شد و در تمام طول مدت آزمایش، ارتفاع آب روی ستون خاک ۵ سانتی متر ثابت بود. برای مرز پایینی ستون خاک، جریان ثابت با پتانسیل فشاری صفر در نظر گرفته شد.

(۱۶، ۱۸). میزان برومید مورد نیاز برای هر ستون با توجه به وزن خشک ستون‌ها، از نمک برومید پتاسیم محاسبه و میزان نمک مورد نیاز برای هر ستون در ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر حل و به ستون‌ها اضافه گردید. آبشویی یا آبیاری ستون‌ها به صورت جریان اشباع ماندگار و با بار آبی ثابت به صورت یکنواخت از شروع تا پایان آزمایش تا ۴ حجم خلل و فرج^۵ انجام شد. بعد از تهیه ستون‌ها به صورت تدریجی و از سمت پایین به بالا (به منظور خروج بهتر هوای محبوس و اشباع کامل ستون‌ها) توسط بار آبی ایجاد شده روی انتهای آن‌ها، ستون‌های خاک اشباع گردیدند. پس از اشباع ستون‌های خاک، در ارتفاع ۵ سانتی متر بالای سطح خاک مجرای خروجی برای خروج آب اضافی تعبیه شد و آب به ستون‌ها اضافه گردید، به طوری که شدت اضافه شدن آب، بیشتر از سرعت نفوذ آب در خاک بود. بنابراین در طول مدت آزمایش، ارتفاع ثابتی از آب روی خاک وجود داشت (مقدار اضافی توسط مجرای خروجی تخلیه می شد). مقدار غلظت برومید در زه آب خروجی توسط الکتروود انتخابگر برومید در زمان‌های مختلف اندازه گیری گردید. زمان‌های اندازه گیری غلظت برومید برای خاک شن لومی برابر صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۷۵ و ۵۰۰ دقیقه (پس ۵۰۰ دقیقه ۴ پوروالیوم زه آب از خاک خارج گردید) و برای خاک لوم شنی صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۳۰۰، ۴۵۰ و ۶۰۰ پس ۶۰۰ دقیقه ۴ پوروالیوم زه آب از خاک خارج گردید) بودند. در پایان آزمایش، تا عمق ۱۲ سانتی متری خاک، ۶ نمونه (هر ۲ سانتی متر یک نمونه)، از عمق ۱۲ تا ۲۰ سانتی متر ۲ نمونه (هر ۴ سانتی متر یک نمونه) و بین ۲۰ تا ۲۵ سانتی متر یک نمونه از هر ستون خاک گرفته شد و غلظت برومید در آن‌ها تعیین گردید. به این صورت که نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، کوبیده و از الک دو میلی متری عبور داده شدند، سپس ۱۰ گرم خاک توزین و به هر نمونه ۵۰ سی سی آب مقطر و ۲ سی سی نیترات پتاسیم ۲/۵ مولار (برای تثبیت قدرت یونی) اضافه و مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آزمایشگاه به حالت سکون قرار داده شدند. در پایان با استفاده از الکتروود انتخابگر برومید، غلظت برومید در محلول تعیین گردید (۵).

واسنجی و آنالیز حساسیت مدل

مدل باید بر اساس مقادیر اندازه گیری شده (در این مطالعه غلظت برومید در محلول) و واسنجی شود. اطلاعات ورودی به مدل، شامل اطلاعات هیدرولیکی، بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، شرایط اولیه پروفیل خاک از نظر رطوبت و غیره می‌باشند. با دادن این اطلاعات به مدل و با توجه

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت مدل

شکل های ۱، ۲، ۳ و ۴ نتایج تحلیل حساسیت مدل HYDRUS را به ترتیب برای چهار پارامتر هیدرولیکی مهم رطوبت اشباع، پراکنش پذیری، درصد آب غیر متحرک و ضریب پخشیدگی در آب نشان می دهند. در هر شکل از سری ۱ تا ۵ مقدار پارامتر مورد نظر افزایش یافته است. کمترین تأثیر مربوط به ضریب پخشیدگی در آب بود که افزایش میزان آن، حداقل

تأثیر را بر غلظت پیش بینی شده زه آب خروجی خاک های مورد مطالعه داشت، در حالی که مدل بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات رطوبت اشباع نشان داد. در این روش فرض می شود که هر پارامتر ناشناخته، به طور یکسان در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است. حدهای حداکثر و حداقل این دامنه را می توان بر اساس تجربیات و یا آزمایش ها و اندازه گیری های انجام شده در مطالعات قبلی و یا از منابع علمی انتخاب نمود.

شکل ۱- آنالیز حساسیت برای پارامتر رطوبت اشباع (افزایش شماره سری منحنی، نشان دهنده ی افزایش مقدار پارامتر در مدل است).

شکل ۲- آنالیز حساسیت برای پارامتر پراکنش پذیری (افزایش شماره سری منحنی، نشان دهنده ی افزایش مقدار پارامتر در مدل است).

شکل ۳- آنالیز حساسیت برای پارامتر درصد آب غیر متحرک (افزایش شماره سری منحنی، نشان دهنده ی افزایش مقدار پارامتر در مدل است).

شکل ۴- آنالیز حساسیت برای پارامتر ضریب پخشیدگی (افزایش شماره سری منحنی، نشان دهنده ی افزایش مقدار پارامتر در مدل است).

پیش بینی آبخشویی برومید توسط مدل CDE

مطالعات قبلی نشان می دهد که معادله CDE در ستون های دست خورده نسبت به معادله CDE غیر تعادلی (NECDE)^(۸) جواب بهتری می دهد (۱۰)، ولی در این آزمایش، معادله NECDE پیش بینی بهتری از حرکت برومید در هر دو نوع خاک (شکل های ۵ و ۶) نشان داد. نتایج برخی محققان نشان داد که در خاک های غیر همگن، مدل غیر تعادلی حرکت املاح در مقایسه با مدل تعادلی کارایی بیشتری دارد (۱۵). شکل ۵ برازش غلظت در زه آب را توسط این دو مدل در خاک شن لومی و تحت غلظت اضافه شده ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم برومید نشان می دهد که در تیمارهای دیگر نیز همین روند، یعنی برازش بهتر مدل NECDE نسبت به CDE دیده شد. دلیل آن ممکن است مربوط به این باشد که ستون های خاک بعد از اشباع شدن به مدت یک ماه در شرایط هوای آزاد قرار گرفتند تا خشک شوند و سپس دوباره اشباع گردیدند که همین عمل منجر به نظم جدید ذرات خاک (در نتیجه حرکت متفاوت برومید در خاک) و ناهمگنی آن گردیده و موجب شده که معادله NECDE نسبت به CDE در این مطالعه نتایج بهتری ارائه نماید. این نتایج با مطالعات مرادی و همکاران و همچنین تحقیقات بوخولد هم خوانسی دارد که گزارش نمودند، در خاک های ناهمگن و یا خاکدانه ای، مدل غیر تعادلی برآورد دقیق تری نسبت به مدل تعادلی دارد (۷، ۱۷). هم چنین، طبق نظر Jiang و همکاران (۱۲)، در خاک های ساختمان دار به علت احتمال وجود جریان ترجیحی، مدل غیر تعادلی پیش بینی بهتری از حرکت املاح در خاک ارائه می نماید. در مدل NECDE آب خاک به دو بخش متحرک و ساکن تقسیم شده که در بخش متحرک، فرایند انتقال عمدتاً در اثر جریان روان و پراکنش صورت می گیرد، ولی در بخش ساکن، فرایند انتقال عمدتاً در اثر پخشیدگی انجام می شود. بنابراین در خاک های ساختمان دار پیش بینی بهتری از حرکت املاح در خاک نشان می دهد. در صورتی که در خاک هایی با ساختمان منفرد (مثل خاک های شنی) مدل CDE بهتر جواب می دهد. Vogeler و همکاران (۲۱) در یک آزمایش لایسمتری با خاک های دست خورده، حرکت برومید و نیترات را در یک خاک تیمار شده با لجن فاضلاب با استفاده از معادله ی CDE غیر تعادلی شبیه سازی نمودند. نتایج نشان داد که این مدل به خوبی توانست حرکت برومید و نیترات در خاک را شبیه سازی کند.

پیش بینی غلظت برومید در ستون خاک

نتایج اندازه گیری غلظت برومید در عمق های مورد نظر (ذکر شده در بخش مواد و روش ها) نشان داد که در همه ی عمق ها، غلظت برومید کمتر از حساسیت دستگاه اندازه گیری بود و با توجه به این که برآورد مدل از غلظت برومید در پروفیل خاک نیز خیلی کمتر از حساسیت دستگاه بود (شکل های ۷ و ۸)، می توان گفت مدل پیش بینی خوبی از غلظت پروفیل داشته است و غلظت های برآورد شده توسط مدل، همگی کمتر از حساسیت دستگاه اندازه گیری می باشند. با توجه به این که برومید آنیونی است که توسط خاک جذب نمی گردد و بافت خاک های مورد مطالعه نیز نسبتاً درشت بود، شسته شدن زیاد برومید و خروج آن از خاک امری کاملاً منطقی به نظر می رسد. Wang و همکاران (۲۲) در یک آزمایش مزرعه ای نشان دادند که حرکت یون برومید نسبت به آنیون های مشابه مانند نیترات در نیم رخ خاک خیلی سریع تر می باشد. برآورد مدل از غلظت

در پروفیل، نشان داد که غلظت برومید در خاک لوم شنی در هر سه سطح برومید، بیشتر از خاک شن لومی بود. این مسئله با توجه به دارا بودن مقدار رس بیشتر خاک لوم شنی نسبت به شن لومی و در نتیجه وجود خلل و فرج ریزتر در این خاک نسبت به شن لومی دور از انتظار نیست. زیرا درصدی از محلول خاک که وارد خلل و فرج ریز می شود و جزء آب غیر متحرک محسوب می گردد، در خاک لوم شنی نسبت به شن لومی بیشتر می باشد و با توجه به خلل و فرج ریز بیشتر در خاک لوم شنی، غلظت در پروفیل نیز در این بافت خاک بیشتر است. هم چنین، در هر دو بافت خاک، بیشترین غلظت پروفیل در عمق ۲۳ تا ۲۵ سانتی متر برآورد شد، زیرا برومید یک آنیون است که توسط خاک جذب نمی شود و به راحتی شسته شده و به انتهای ستون خاک حرکت می کند و در عمق های کمتر، غلظت برومید کاهش می یابد. هم چنین، با افزایش غلظت اضافه شده به ستون های خاک، مقدار برومید پیش بینی شده توسط مدل در پروفیل خاک، افزایش یافت که نتیجه این تحقیق با نتایج تحقیقات باترز و جوری روی حرکت برومید در خاک مطابقت دارد (۸).

پیش بینی غلظت برومید در زه آب خروجی

پس از اندازه گیری غلظت برومید، اطلاعات مورد نیاز برای راه اندازی مدل از ستون ها گرفته شد و در نهایت غلظت های برآورد شده از زه آب خروجی ستون با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه مقایسه شد. همان طوری که در شکل های ۹ تا ۱۴ نشان داده شده است (در این شکل ها منحنی های پیوسته مربوط به مقادیر مشاهده ای و منحنی های خط چین مربوط به مقادیر برآوردی می باشند)، در خاک شن لومی بیشترین غلظت زه آب خروجی در زمان ۱۰۰ تا ۱۲۰ دقیقه بعد از شروع آزمایش مشاهده می گردد که این زمان در خاک لوم شنی به ۱۵۰ دقیقه بعد از شروع آزمایش می رسد. با توجه به بافت ریزتر خاک لوم شنی نسبت به شن لومی، حرکت آب و املاح در این خاک کندتر بوده و زمان رسیدن به بیشترین غلظت زه آب در آن طولانی تر خواهد بود که آزمایشات هم این مسئله را تصدیق می کند. در مورد برآورد مدل از غلظت زه آب، مدل هم زمان رسیدن به بیشترین غلظت و هم مقدار حداکثر غلظت را به خوبی برآورد کرد و ضرایب تبیین بالای ۹۰ درصد نشان دهنده کارایی خیلی خوب مدل در برآورد غلظت زه آب خروجی می باشد (منحنی خط چین مربوط به پیش بینی مدل و منحنی پیوسته مربوط به داده های اندازه گیری است). هم چنین در شکل های ۹ تا ۱۴ مشاهده می شود، قسمت بالا رونده ی منحنی با قسمت پایین رونده ی آن دارای شیب یکسان نمی باشد که این مسئله احتمالاً به دلیل تشکیل ساختمان در ستون خاک است. بنابراین هنگامی که برومید به ستون خاک اضافه شد، ممکن است ابتدا در اثر فرایند پخشیدگی از ناحیه متحرک به ناحیه غیر متحرک رفته و پس از عبور پالس برومید از خاک، دوباره از ناحیه غیر متحرک وارد ناحیه متحرک شده و موجب می شود که قسمت پایین رونده ی منحنی حالت کشیده تری نسبت به قسمت بالا رونده داشته باشد. هر چه پارامتر D (ضریب پخشیدگی نمک یا یون در خاک) بزرگتر باشد، پالس املاح بیشتر پراکنده شده و ارتفاع منحنی کاهش می یابد و با توجه به این که پارامتر D در هر دو بافت خاک با هم مشابه است، مشاهده می شود که ارتفاع منحنی ها در تیمار معینی در هر دو بافت، تقریباً یکسان می باشد.

شکل ۵- برازش مقادیر اندازه گیری شده غلظت برومید در زه آب خروجی توسط مدل های CDE و NECDE در خاک شن لومی تحت تیمار ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم برومید.

شکل ۶- برازش مقادیر اندازه گیری شده غلظت برومید در زه آب خروجی توسط مدل های CDE و NECDE در خاک لوم شنی تحت تیمار ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم برومید.

شکل ۷ - پیش بینی پروفیل غلظت برومید در خاک شن لومی (سطوح مختلف غلظت برومید اضافه شده به خاک بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم می باشد).

شکل ۹ - شبیه سازی غلظت در زه آب خروجی تحت سطح اول (۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک شن لومی.

شکل ۸ - پیش بینی پروفیل غلظت برومید در خاک لوم شنی (سطوح مختلف غلظت برومید اضافه شده به خاک بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم می باشد).

شکل ۱۰ - شبیه سازی غلظت در زه آب خروجی تحت سطح دوم (۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک شن لومی.

شکل ۱۱- شبیه‌سازی غلظت در زه‌آب خروجی تحت سطح سوم
(۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک شن لومی.

شکل ۱۲- شبیه‌سازی غلظت در زه‌آب خروجی تحت سطح اول
(۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک لوم شنی.

شکل ۱۳- شبیه سازی غلظت در زه آب خروجی تحت سطح دوم
(۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک لوم شنی.

شکل ۱۴- شبیه سازی غلظت در زه آب خروجی تحت سطح سوم
(۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک لوم شنی.

