پژوهش های آبخیزداری شماره ۹۲، پاییز ۱۳۹۰
(پژوهش و سازندگی)

شبیه‌سازی حرکت بروميد در ستون‌های دست‌خورده خاک با استفاده از مدل HYDRUS–1 D

• **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 آنیون ها در خاک به دلیل آبشویی سریع و عدم جذب توسط ذرات خاک و رسیدن به آب های زیرزمینی، اهمیت ویژه ای دارد. بروميد 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. لذا این تحقیق به منظور شبیه سازی حرکت یون بروميد در ستون های دست خورده خاک (۱۰ سانتی متر قطر و ۲۵ سانتی متر ارتفاع) در دو بافت شن لومی و لوم شنی توسط مدل HYDRUS-۱D انجام شد. یون بروميد (از منبع بروميد پتاسیم) در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک و در ۶ تکرار به ستون های خاک جهت آزمایش آبشویی اضافه گردید. آبشویی بروميد تا ۴ حجم خلل و فرج انجام و غلظت بروميد در زه آب خروجی اندازه گیری شد. انتقال برمید در خاک لوم شنی آهسته تر 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 پیش بینی شده زه‌آب خروجی خاک های مورد مطالعه داشت، در حالی که مدل بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات رطوبت اشباع نشان داد. مدل HYDRUS-۱D پیش بینی خوبی از غلظت برمید در زه آب نشان داد (ضریب تبیین بیشتر از ۹۰ درصد). معادله NECDE (معادله جریان روان-پخشیدگی غیر تعادلی) پیش‌بینی بهتری از حرکت بروميد در خاک نسبت به معادله CDE (معادله جریان روان-پخشیدگی) نشان داد.

کلمات کلیدی: شبیه سازی، بروميد، مدل هایدروس۱ بعدی(HYDRUS-۱D)، آبشویی

www.SID.ir

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 Rafsanjan, Rafsanjan,Iran. (Corresponding Author; Tel: +989135192115) Mojtaba Kord, Msc, Technical Office of 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 Dw (ion diffusion coefficient in water) and θs (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 (R2>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 شـدن آلودگی خاک به یک مشـکل زیست محیطی، اهمیت پیـش بینـی جریان آب در منطقه غیر اشـباع به طـور روزافزونی در حال گسـترش است. واضح است که باید نقش منطقه غیراشباع، به صورت محل نابـودی و یا تولید، برای ارزیابی آلودگی آب هـای 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).

امـلاح موجود در خاک یا آن‌هایی که به خاک اضافه می‌شـوند، درگیر واکنش‌های متفاوتی مانند رسوب، جذب سطحی، جذب به وسیله گیاهان و یـا انتقال در خاک می گردند. انتقال املاح در خاک به سـه طریق انجام می‌گیرد که شـامل جریان روان (توده‌ای)[1]، پخشیدگی[2] و انتشار[3] است. در جریـان روان، انتقال املاح همراه محلول خاک صورت می‌گیرد. این شـکل انتقال در مواردی که سرعت جریان محلول خاک و حلالیت املاح بالاست، قسـمت عمده انتقال را شـامل می‌شود. در مکانیسـم پخشیدگی، املاح از محلـی که غلظت بیشـتری دارد به محلی که غلظت کمتـری دارد انتقال می‌یابند و عامل این حرکت شـیب غلظت می‌باشـد. در مکانیسـم انتشار، اختلاف سرعت مکانی املاح، سبب پراکنش می‌گردد. بنابراین پراکنش فقط موقعی موثر است که محلول خاک در حرکت باشد، در حالی‌که پخشیدگی در حالت سـکون نیز انجام می‌شـود (۱ ، ۲). آنیون‌های معمول در خاک به دلیل اهمیت آن‌ها از نظر شـوری، حاصلخیزی و آلودگی آب‌های زیرزمینی دارای اهمیت خاص خود هستند. غیر فعال بودن اکثر آنیون‌ها و عدم جذب آن‌ها بر روی مکان‌های جذب در خاک بر اهمیت مطالعه آن‌ها افزوده است. چون به راحتی می‌توانند با کمی آبشویی از پروفیل خاک شسته شده و وارد آب‌های زیرزمینی گردند (۲).

بروميد از جمله یون هائی اسـت که به راحتی شسـته شده و به دلیل ایـن خاصیت، به عنوان ردیاب حرکت آب و املاح در خاک مورد توجه قرار گرفته اسـت. استفاده از بروميد به عنوان ردیاب به این دلیل ارجحیت دارد که غلظـت اولیه بروميد در خاک‌هـای ایران (آنیون غالب کلر اسـت) کم می‌باشـد و باعث آلودگی خاک نمی‌شود. هم چنین در فرایندهای پیچیده شـیمیایی و بیولوژیک مانند نیترات شرکت نمی‌کند و غلظت آن در خاک پس از نمونه‌برداری با زمان تغییر نمی‌کند (۶).

اسـتفاده 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 بینـی زمانی مفید و کاربردی اسـت که دقت و اعتبـار مدل در این برآورد، ابتدا بررسی شده باشد. بنابراین، قبل از استفاده از این مدل ها، باید کارایی آن ها در شـرایط کنترل شـده ارزیابی گردد. بدین معنی که ابتدا با توجه داده های مشاهده ای، پارامترهای مدل بهینه می گردند که نیاز به شرایط کنترل شـده دارد. لذا انجام تحقیقات در زمینـه ارزیابی مدل ها و انتخاب مدل مناسـب و هم چنین بهینه سـازی پارامترهای مدل در شرایط دقیق آزمایشـگاهی و کنترل شده، قبل از استفاده از آن در شرایط طبیعی، امری ضروری محسوب می شود.

مـدل نرم‌افزاری HYDRUS-1D به منظور شبیه‌سـازی یک بعدی حرکت آب، حرارت و املاح در محیط متخلخل و شـرایط مختلف رطوبتی ایجاد شـده و توسعه یافته است. این مدل برای توضیح حرکت آب و املاح به ترتیب از معادلات ریچارد و جریان روان – پخشـیدگی استفاده می‌کند. هم‌چنین، کلیه فرایندهای جذب آب توسـط ریشـه، شرایط مختلف اولیه،

Archive of SID

www.SID.ir

مرز ورودی و خروجی آب و املاح در این مدل در نظر گرفته می‌شود. در مدل HYDRUS-1D فرض بر این است که املاح می‌توانند در هر سه فاز جامد، مایع و گاز خاک وجود داشته باشند. هر فاز ضرایب تولید و نابودی مربوط به خود را دارد و برهم‌کنش بین جامد و مایع با معادلات غیر خطی غیر تعادلی و برهم‌کنش بین فازهای مایع و گاز به صورت خطی و آنی بیان می‌شوند (۱۹). در این مدل فرض می‌شود که املاح در فاز مایع در اثر فرایندهای جریان روان، پخشیدگی و انتشار، انتقال می‌یابند، در صورتی که در فاز گازی خاک، فقط فرایند پخشیدگی عامل انتقال است. Casey و Simunek (۹) حرکت هیدروکربن تری‌کلرواتیلن 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 می‌شود و ترکیب نهایی قابل ردیابی اتیلن است. نتایج نشان داد که در نظرگرفتن جذب غیر تعادلی نسبت به جذب تعادلی، باعث تخمین بهتر پارامترهای ضریب نابودی و سرعت واکنش می‌شود. 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 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 مدل‌سازی گردید. ابتدا اطلاعات و داده‌های مربوط به اندازه‌گیری حرکت برومید جمع‌آوری شد و سپس پارامترهای لازم برای شبیه سازی حرکت املاح اندازه‌گیری شده و در نهایت با راه‌اندازی و اجرای مدل‌ها بر مبنای پارامترهای ورودی، میزان حرکت برومید برآورد شده و با مقادیر اندازه‌گیری 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 ستون‌های خاک مورد استفاده برای انجام آزمایش ۲۵ سانتی‌متر بود که در زیر ستون‌ها ۵ سانتی‌متر 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 × 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 ویژگی‌های 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 الکترود 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 میلی‌گرم 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 درخاک در شرایط وجود پالس های مختلف ورودی برومید به خاک انجام شد

Archive of SID

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

نوع بافت	رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)	ماده آلی (٪)	تخلخل (٪)	BD (g/cm۳)	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)

(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 میلی‌لیتر آب مقطر حل و به ستون‌ها اضافه گردید. آبشویی یا آبیاری ستون ها 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 ستون ها به صورت تدریجی و از سمت پایین به بالا (به منظور خروج بهتر هوای محبوس و اشباع کامل ستون ها) توسط بار آبی ایجاد شده روی انتهای آن ها، ستون های خاک اشباع گردیدند. پس از اشباع ستون های خاک، در ارتفاع ۵ سانتی متر بالای سطح خاک مجرای خروجی برای خروج آب اضافی تعبیه شد و آب به ستون ها 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 الکترود انتخابگر برومید در زمان های مختلف اندازه گیری گردید. زمان های 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 سانتی‌متری خاک، ۶ نمونه (هر ۲ سانتی‌متر 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 آن ها تعیین گردید. به این صورت که نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، کوبیده و از الک دو میلی‌متری 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 الکترود انتخابگر برومید، غلظت برومید در محلول تعیین گردید (۵).

واسنجی و آنالیز حساسیت مدل

مدل باید بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده (در این مطالعه غلظت برومید در محلول) 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 به مقادیر اندازه گیری شده غلظت برومید در زه‌آب، پارامترهای حساس مدل (یعنی پارامترهایی که مدل به تغییر مقادیر آن ها حساس بوده و با تغییر آن‌ها، نتایج مدل تغییرات قابل توجهی پیدا می کند) نظیر ضریب پخشیدگی-پراکنش‌پذیری 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 آزمایش ها و اندازه گیری های 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 نمونه های 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 ویژگی های هیدرولیکی خاک شامل پارامترهای منحنی رطوبتی خاک و نیز پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks)، رطوبت باقی مانده ($r\theta$) و رطوبت اشباع ($s\theta$) در مدل ون گنوختن ـ 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 این‌که 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[۶] در نظر گرفته شد و در تمام طول مدت آزمایش، ارتفاع آب روی ستون خاک ۵ سانتی‌متر ثابت بود. برای مرز پایینی ستون خاک، جریان ثابت[۷] با پتانسیل فشاری صفر در نظر گرفته شد.

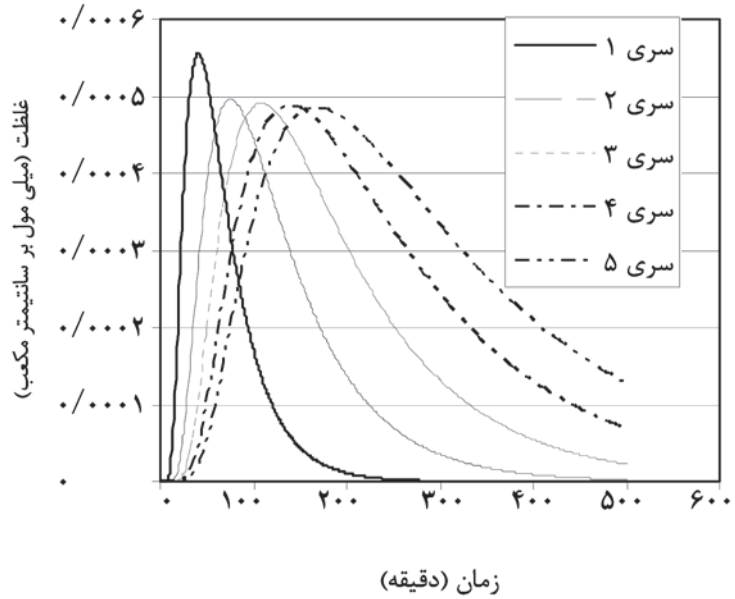
Archive of SID

www.SID.ir

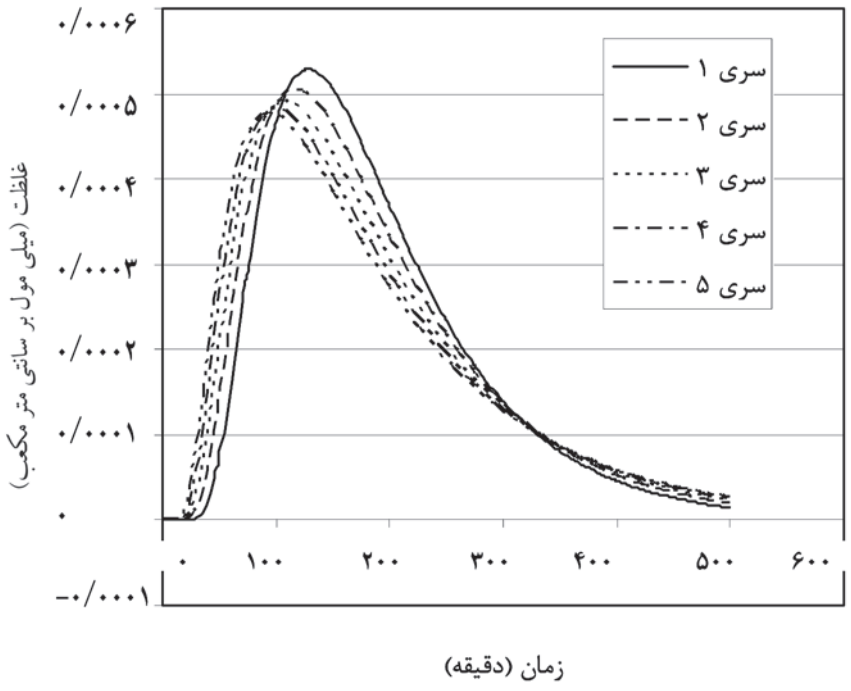
نتایج و بحث

تحلیل حساسیت مدل

شـکل های ۱، ۲، ۳ و ۴ نتایج تحلیل حساسیت مدل HYDRUS را به ترتیب برای چهار پارامتر هیدرولیکی مهم رطوبت اشباع، پراکنش‌پذیری، درصد آب غیر متحرک و ضریب پخشـیدگی در آب نشان می‌دهند. در هر شـکل از سـری ۱ تا ۵ مقدار پارامتر مورد نظر افزایش یافته است. کمترین تأثیر مربوط به ضریب پخشـیدگی در آب بود که افزایش میزان آن، حداقل تأثیر را بر غلظت پیش بینی شـده زه‌آب خروجی خاک های مورد مطالعه داشـت، در حالی که مدل بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات رطوبت اشـباع نشـان داد. در این روش فرض می شـود که هر پارامتر ناشـناخته، بـه طور یکسـان در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شـده اسـت. حـدهـای حداکثـر و حداقل این دامنه را می توان بر اسـاس تجربیات و یا آزمایـش ها و اندازه گیری های انجام شـده در مطالعات قبلی و یا از منابع علمی انتخاب نمود.

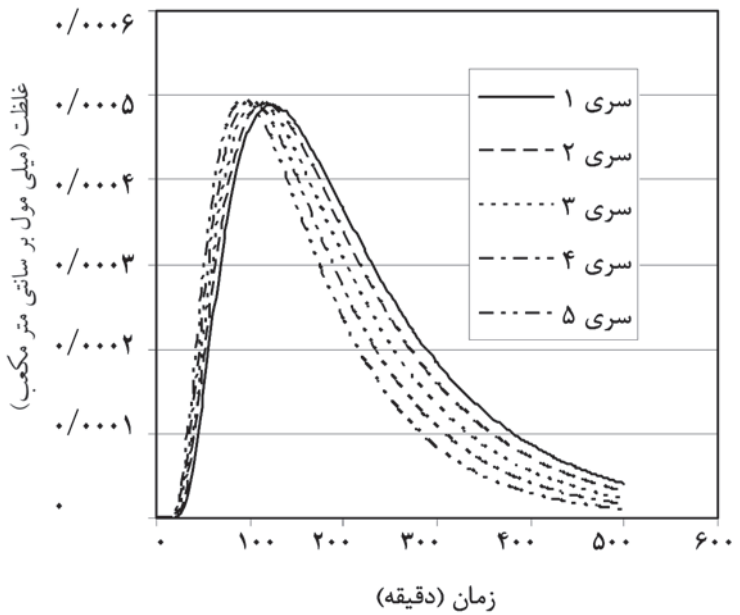


شکل ۱- آنالیز حساسیت برای پارامتر رطوبت اشباع (افزایش شماره سری منحنی، نشان دهنده ی افزایش مقدار پارامتر در مدل است).

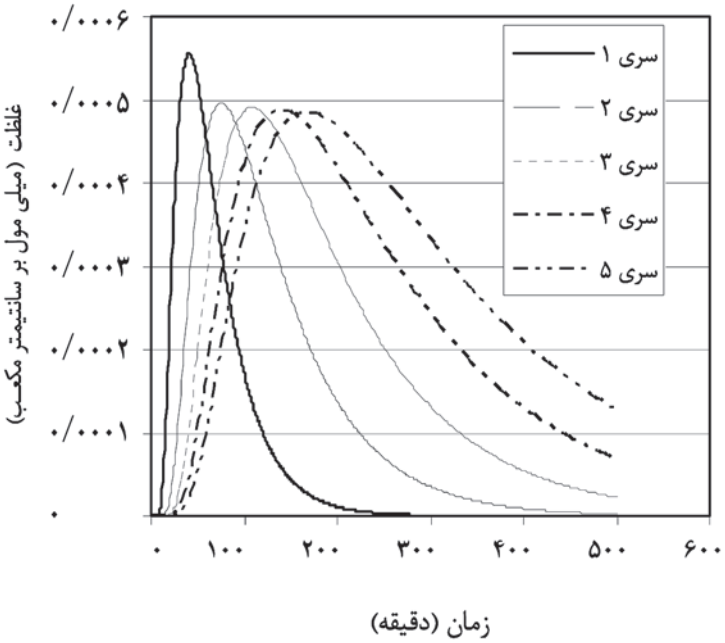


شکل ۲- آنالیز حساسیت برای پارامتر پراکنش پذیری (افزایش شماره سری منحنی، نشان دهنده ی افزایش مقدار پارامتر در مدل است).

www.SID.ir



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).

www.SID.ir

پیش‌بینی آبشویی برومید توسط مدلCDE

مطالعات قبلی نشان می‌دهد که معادله CDE در ستون‌های دست‌خورده نسبت به معادله CDE غیر تعادلی (NECDE [8]) جواب بهتری می‌دهد (۱۰)، ولی در این آزمایش، معادله NECDE پیش‌بینی بهتری از حرکت برومید در هر دو نوع خاک (شکل های ۵ و ۶) نشان داد. نتایج برخی محققان نشان داد که در حاک 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 ستون‌ها ی 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 هم‌خوانی 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 می‌گیرد، ولی در بخش ساکن، فرایند انتقال عمدتاً در اثر پخشیدگی انجام می‌شود. بنابراین در خاک های ساختمان دار پیش بینی بهتری از حرکت املاح در خاک نشان می دهد. در صورتی که در خاک هائی 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 عیر تعادلی شبیه سازی نمودند. نتایج نشان داد که این مدل به خوبی توانست حرکت برومید و نیترات در خاک را شبیه سازی کند.

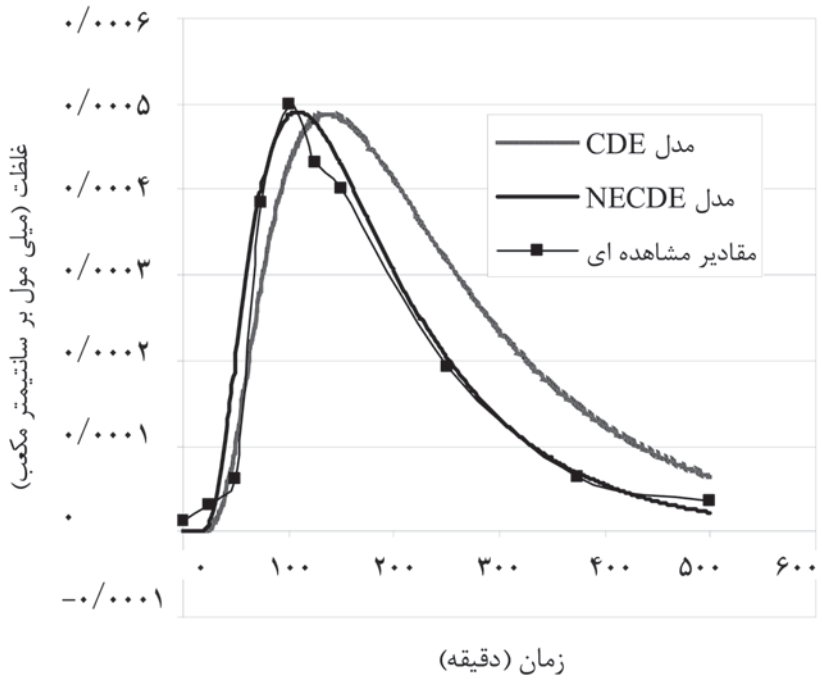
پیش‌بینی غلظت برومید در ستون خاک

نتایج اندازه گیری غلظت برومید در عمق های مورد نظر (ذکر شده در بخش مواد و روش ها) نشان داد که در همه ی عمق‌ها، غلظت برومید کمتر از حساسیت دستگاه اندازه‌گیری بود و با توجه به این که برآورد مدل از غلظت برومید در پروفیل خاک نیز خیلی کمتر از حساسیت دستگاه بود (شکل‌های ۷ و ۸)، می توان گفت مدل پیش‌بینی خوبی از غلظت پروفیل داشته است و غلظت‌های برآورد شده توسط مدل، همگی کمتر از حساسیت دستگاه اندازه‌گیری می‌باشند. 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 می‌شود و جزء آب غیر متحرک محسوب می گردد، در خاک لوم شنی نسبت به شن لومی بیشتر می‌باشد و با توجه به خلل و فرج ریز بیشتر در خاک لوم شنی، غلظت در پروفیل نیز در این بافت خاک بیشتر است. هم‌چنین، در هر دو بافت خاک، بیشترین غلظت پروفیل در عمق ۲۳ تا ۲۵ سانتی‌متر برآورد شد، زیرا برومید یک آنیون است که توسط خاک جذب نمی‌شود و به راحتی شسته شده و به انتهای ستون خاک حرکت می کند و در عمق های کمتر، غلظت برومید کاهش می یابد. هم‌چنین، با افزایش غلظت اضافه شده به ستون‌های 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).

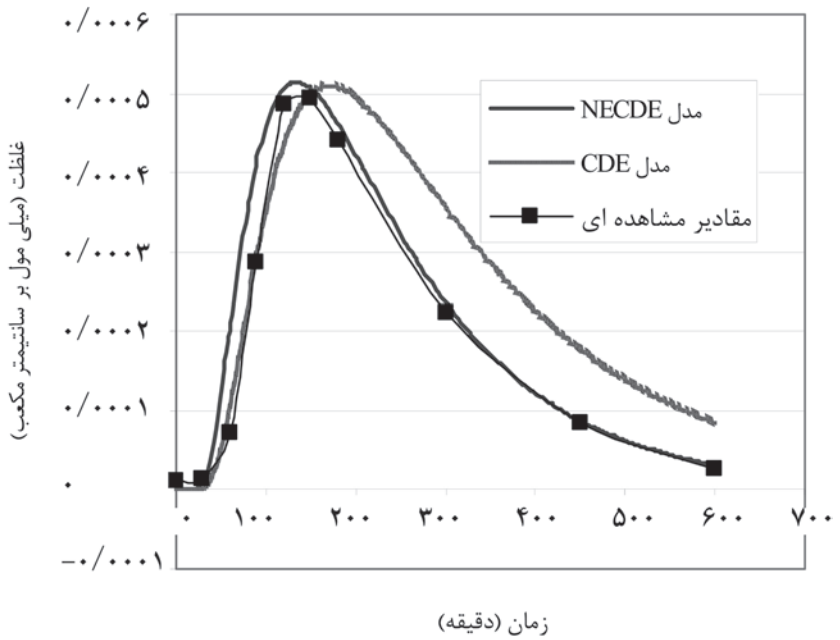
پیش‌بینی غلظت برومید در زه‌آب خروجی

پس از اندازه‌گیری غلظت برومید، اطلاعات مورد نیاز برای راه‌اندازی مدل از ستون‌ها گرفته شد و در نهایت غلظت‌های برآورد شده از زه‌آب خروجی ستون با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه شد. همان‌طوری 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 زه‌آب در آن طولانی‌تر خواهد بود که آزمایشات هم این مسئله را تصدیق می کند. در مورد برآورد مدل از غلظت زه‌آب، 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 زه‌آب خروجی می‌باشد (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 پایین‌رونده ی آن دارای شیب یکسان نمی‌باشد 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 می‌یابد و با توجه به این که پارامتر D در هر دو بافت خاک با هم مشابه است، مشاهده می شود که ارتفاع منحنی‌ها در تیمار معینی در هر دو بافت، تقریباً یکسان می‌باشد.

Archive of SID

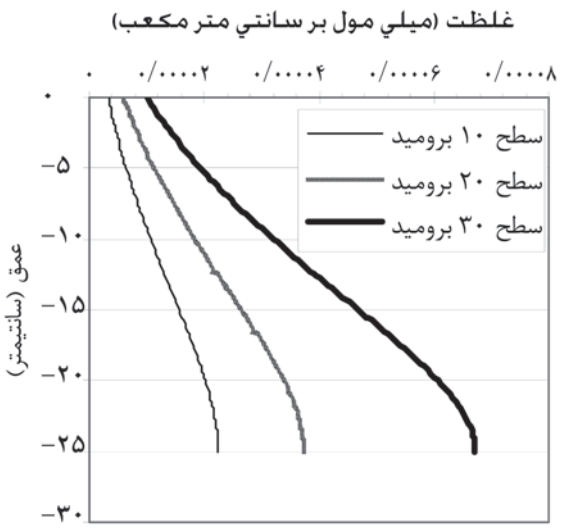


شکل ۵- برازش مقادیر اندازه گیری شده غلظت برومید در زه آب خروجی توسط مدل های CDE و NECDE در خاک شن لومی تحت تیمار ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم برومید.

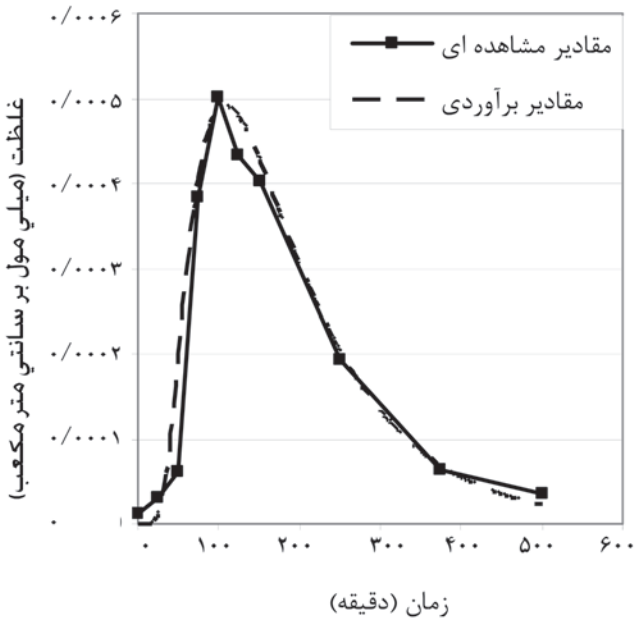


شکل ۶- برازش مقادیر اندازه گیری شده غلظت برومید در زه آب خروجی توسط مدل های CDE و NECDE در خاک لوم شنی تحت تیمار ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم برومید.

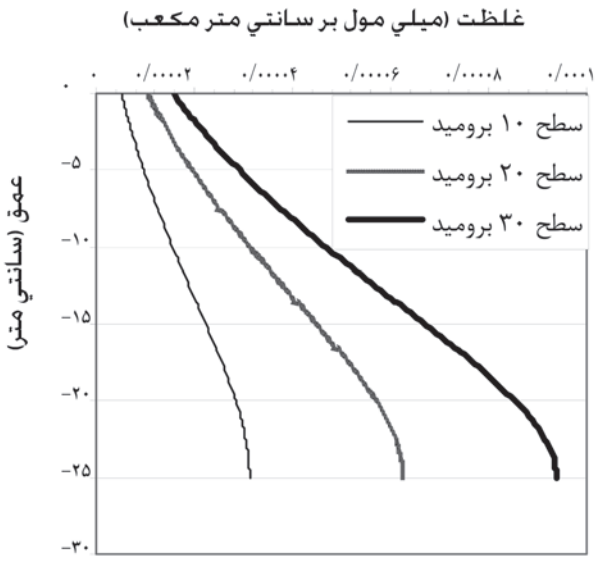
www.SID.ir



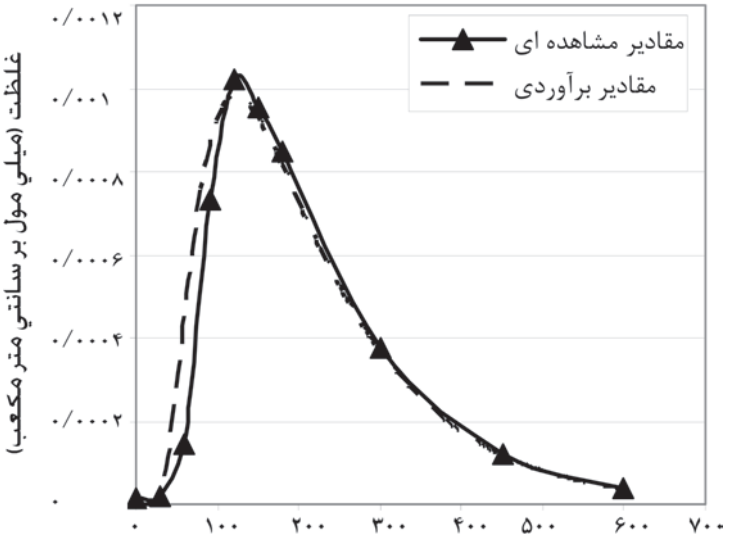
شکل ۷ – پیش بینی پروفیل غلظت برومید در خاک شن لومی (سطوح مختلف غلظت برومید اضافه شده به خاک بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم می باشد).



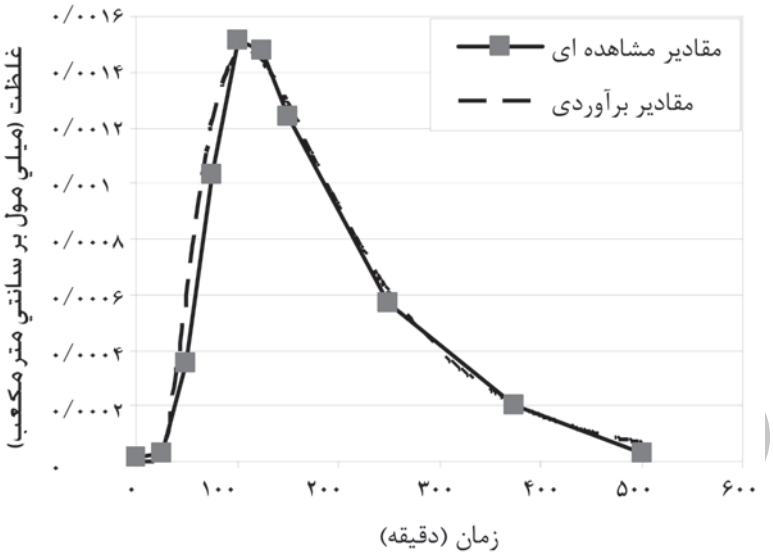
شکل ۹- شبیه‌سازی غلظت در زه‌آب خروجی تحت سطح اول (۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک شن لومی.



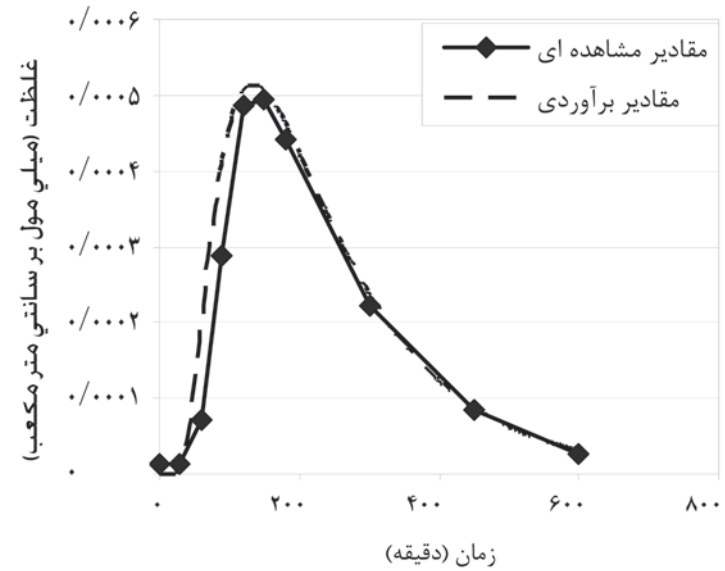
شکل ۸ – پیش بینی پروفیل غلظت برومید در خاک لوم شنی (سطوح مختلف غلظت برومید اضافه شده به خاک بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم می باشد).



شکل ۱۰- شبیه‌سازی غلظت در زه‌آب خروجی تحت سطح دوم (۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک شن لومی.

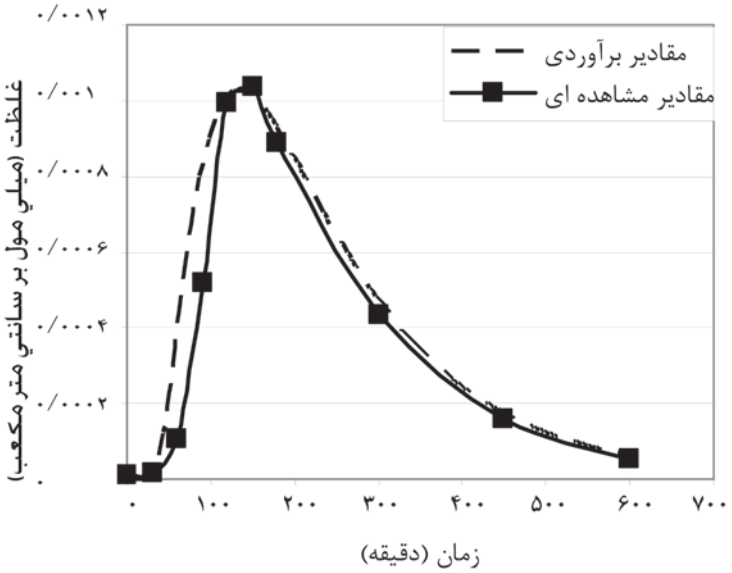


شکل ۱۱- شبیه‌سازی غلظت در زه‌آب خروجی تحت سطح سوم (۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک شن لومی.

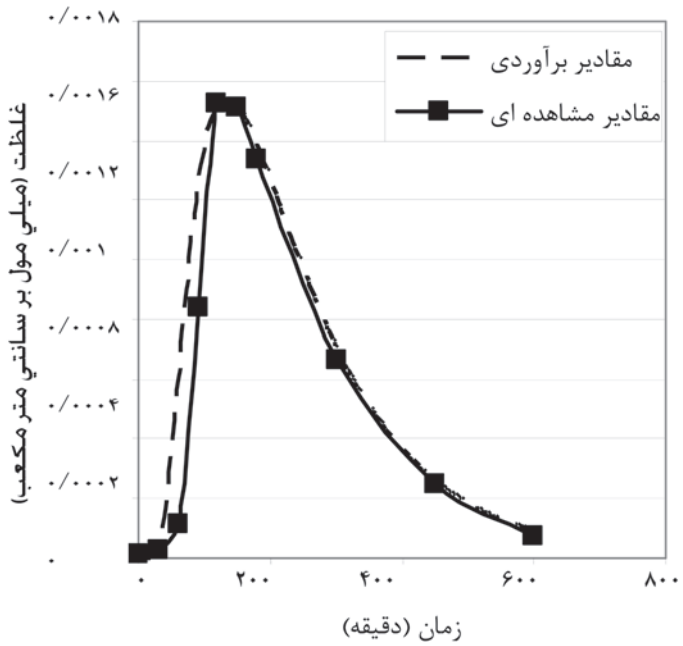


شکل ۱۲- شبیه‌سازی غلظت در زه‌آب خروجی تحت سطح اول (۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک لوم شنی.

www.SID.ir



شکل ۱۳- شبیه‌سازی غلظت در زه‌آب خروجی تحت سطح دوم (۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک لوم شنی.



شکل ۱۴- شبیه‌سازی غلظت در زه‌آب خروجی تحت سطح سوم (۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) برومید در خاک لوم شنی.

پاورقی ها

1- Mass flow
2- Diffusion
3- Dispersion
4- Convection Dipersion equation
5- Pore Volume
6- Constant Prossure Head
7- Constant flux
8- Non- Equilibrium CDE

منابع مورد استفاده

۱- رضایی زنگنه، ر. (۱۳۷۷) بررسی حرکت سلنیم در خاک. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی. دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- شعبان پور شهرستانی، م. (۱۳۷۸) حرکت املاح در شرایط مزرعه. پایان نامه دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

۳- صیاد، غ.، موسوی، س. ف.، عباس پور، ک. و افیونی، م. (۱۳۸۷) شبیه سازی حرکت کادمیم، مس، سرب و روی در یک خاک دست نخورده آهکی تحت کشت گندم و گلرنگ با استفاده از مدل انتقال املاح HYDRUS-1D. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۹: ۲۰۰-۱۸۷.

4- Abbaspour, K.C. and Schulin, R. (1996) *Two dimensional flow and transport in unsaturated soils*. Federal Office of Environment, Forests and Landscape, Bern, Switzerland.

5- Abdalla, N.A. and Lear, B.N. (1975) Determination of inorganic bromide in soil and plant tissues with bromide selective-ion electrode. *Common in soil and plant analysis.* 6: 489-494.

6- Afyuni, M., Wagger, M.G. and Leidy, R.B. (1997) Runoff of two sulfonyl urea herbicides in relation to tillage system and rainfall intensity. *J. Environ. Qual.* 26:1318-1326.

7- Boekhold, A.E. and Vander Zee, S.E. A. M. (1992) A scale sorption model validation at the column scale to predict cadmium content in a spatially variable field soil. *Soil Sci*. 154(2): 105-112.

8- Butters, G.L., Jury, W.A. and Ernest, F.F. (1989) Field scale transport of bromide in an unsaturated soil. I: Experimental methodology and results. *Water Resour. Res*. 25: 1575-1581.

9- Casey, F.X.M. and Simunk, J. (2001) Inverse analysis of chlorinated hydrocarbons subjected to sequential transformation reactions. *J. Environ. Qual*. 30: 1354-1360.

10- Dousset, S., Thevenot, M., Pot, V., Simunek, J., and Andreux, F. (2007) Evaluating quilibrium and non-equilibrium transport of bromide and isoproturon in disturbed and undisturbed soil columns. *J. Contamin. Hydro*. 94: 261–276.

11- Jacques, D., Simunek, J., Mallants, D. and van Genuchten, M. Th. (2002) *Multicomponent transport model for variably- saturated porous media*: Application to the transport of heavy metals in soils. pp. 555-562. In: S.M. Hassanizadeh, R.J. Schotting, W.G. Gray and G.F. Pinder (Eds.), Computational Methods in Water Resources, XIVth International Conference on Computational Methods in Water Resources, Delft, The Netherlands.

12- Jiang, S., Liping, P., Buchan, G.D., Simunek, J., Noonan, M.J., Close, M.E. (2010) Modeling water flow and bacterial transport in undisturbed lysimeters under irrigations of dairy shed effluent and water using HYDRUS-1D. *Wate Res.* 44: 1050–1061.

13- Klute, A. (ed.) (1986) *Method of soil analysis*. Part 1- physical and mineralogical methods. Second edition. Agronomy No. 9. America Society of Agronomy, Inc. Soil science society of America, Inc. publisher Madison, Wisconsin. USA.

14- Klute, A. (ed.) (1986) *Method of soil analysis*. Part 2- chemical and biochemical methods. Second edition. Agronomy No. 9. America Society of Agronomy. Inc. Soil science society of America, Inc. publisher Madison, Wisconsin. USA.

15- Kohne, S., Lennartz, B., Kohne, J.M., Simunek, J. (2006) Bromide transport at a tile-drained field site: experiment, and one- and two-dimensional equilibrium and non-equilibrium numerical modeling. *J. Hydr*. 321: 390–408.

16- Li, Z.M., Skogley, E.O. and Ferguson, A.H. (1993) Resin adsorption for describing bromide transport in soil under continuous or intermittent unsaturated water flow. *J. Environ. Qual.* 22:715-722.

17- Moradi, A., Abbaspour, K.C., Afyuni, M. (2005) Modeling field-scale cadmium transport below the root zone of a sewage sludge amended soil in an arid region in central Iran. *J. Contaminant Hydrology*. 79: 187-206.

18- Paramasivam, S., Alva, A. K., Fares, A. and Sajwan, K.S. (2002) Fate of nitrate and bromide in an unsaturated zone of a sandy soil under citrus production. *J. Environ. Qual.* 31:671–681.

19- Simunek, J., Sejna, M. and Van Genuchten, M. Th. (1998) The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, Heat and multiple solutes in variably saturated media. Research Report No. 144, U.S. *Salinity Lab*., USDA, Riverside, California.

20- Starr, J.L., Parlange, J.Y. and Frink, C.R. (1986) Water and chloride movement through a layered field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 50: 1384-1390.

21- Vogeler, I., Green, S.R., Mills, T. and Clothier, B.E. (2006) Modelling nitrate and bromide leaching from sewage sludge. *Soil & Tillage Res*. 89: 177–184.

22- Wang, H., Ju, X., Wei, Y., Li, B., Zhao, L. and Hu, K. (2010) Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain. *Agri. Water Manag.* 97: 1646–1654.

Archive of SID