

شبیه‌سازی آبشویی برمید در یک خاک لوم رسی سیلتی تحت سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی

حسین شیرانی¹، مجید افیونی²، محمدعلی حاج‌عباسی² و عباس همت³

چکیده

انتقال مواد شیمیایی از خاک به آب‌های زیرزمینی، تحت تاثیر ویژگی‌های خاک، مدیریت خاک‌ورزی، مقدار آبشویی و سرعت فرایندهای انتقال است. مدل‌ها اصولاً برای پژوهش‌ها و اعمال مدیریت‌ها مفید بوده و ممکن است در طرح‌ریزی آزمایش‌های ویژه‌ای در مورد حرکت آب و املاح استفاده شوند. این تحقیق در دو سال متوالی در یک زمین مشخص انجام شد. در بررسی‌های صحرایی، تیمارهای خاک‌ورزی شامل شخم با دیسک سطحی + دو دیسک سطحی به عنوان کم‌خاک‌ورزی (عمق خاک‌ورزی 15 سانتی‌متر) (T_1) و شخم با گاواهن برگردان دار + دو دیسک سطحی به‌عنوان خاک‌ورزی مرسوم (T_2) (عمق خاک‌ورزی 30 سانتی‌متر) بودند. تیمارهای ذکر شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با 3 تکرار و تحت کشت ذرت در دو سال اعمال شدند. برای بررسی حرکت برمید در خاک، برمید پتاسیم به صورت کاملاً یک‌نواخت توسط آب‌پاش با غلظت 16/67 گرم در لیتر حدود یک ماه پس از کشت به سطح خاک اضافه شد. سپس مقدار برمید در خاک در عمق‌های صفر تا 15، 15 تا 30، 30 تا 60 و 60 تا 90 سانتی‌متر پس از 2، 5 و 10 آبیاری (مقدار آب آبیاری به ترتیب معادل 126، 315 و 630 میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. حرکت یون برمید در خاک توسط مدل‌های حرکت املاح، معادله پخشیدگی - توده‌ای معین و نامعین (به ترتیب SCDE، DCDE)، مدل دوناچی‌ای رطوبت متحرک و غیر متحرک (MIM) و مدل انتقال منطقه‌ای نامعین (SRM) پیش‌بینی گردید. نتایج نشان داد، با افزایش آبشویی مرکز جرم برمید به عمق پائین‌تری انتقال یافت. این حرکت رو به پائین در سیستم خاک‌ورزی مرسوم با شدت بیشتری مشاهده شد. مقایسه برآورد توزیع غلظت برمید در خاک توسط مدل CDE با مقادیر اندازه‌گیری شده، نشان داد که CDE معین (DCDE) نسبت به CDE نامعین (SCDE) پیش‌بینی دقیق‌تری از حرکت برمید نشان می‌دهد. در سیستم کم‌خاک‌ورزی با افزایش آبشویی برمید، مدل CDE برازش ضعیف‌تری بر داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد. در مقابل در خاک‌ورزی مرسوم مدل CDE پس از 10 آبیاری (630 میلی‌متر آب) برازش خوبی بر داده‌های مشاهده‌ای ارائه نمود. پس از 2 و 5 آبیاری (126 و 315 میلی‌متر آب) برازش مدل CDE بر حرکت برمید در خاک در تیمار کم‌خاک‌ورزی بهتر از تیمار خاک‌ورزی مرسوم بود. مدل‌های MIM و SRM برازش مطلوبی بر روند حرکت برمید در خاک نشان ندادند. به‌طور کلی مدل CDE معین نسبت به مدل‌های دیگر برازش بهتری بر حرکت برمید داشت.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، خاک‌ورزی، برمید، مرکز جرم، مدل

1. استادیار، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان.
2. استادان گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
3. استاد گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

مقدمه

لی و قدرتی (1994) گزارش کردند که حرکت نمک‌ها در خاک در سرعت‌های کم (شدت جریان کم)، توسط سه مدل نامعین (SM^2)، معادله پخشیدگی-توده-ای (CDE)³ و مدل دو ناحیه‌ای رطوبت متحرک و غیر متحرک (MIM)⁴ به‌خوبی قابل پیش‌بینی است. مدل CDE در شرایط جریان ماندگار با مقدار رطوبت ثابت خاک به‌کار می‌رود و بر اساس سرعت جریان آب در منافذ خاک و ضریب پخشیدگی D (نشان‌دهنده مجموع ضرایب پخشیدگی هیدرودینامیکی و پخشیدگی مولکولی نمک مورد نظر در آب خاک) عمل می‌کند. این پژوهش‌گران گزارش نموده‌اند که مدل CDE برای بررسی حرکت نمک‌ها در خاک دست نخورده مناسب می‌باشد، به شرطی که در مورد خاک‌های همگن به‌کار رود. واندربرت و همکاران (1997) گزارش کردند که مدل CDE در خاک‌های یک‌نواخت برازش بهتری از داده‌ها به‌عمل می‌آورد. یاسودا و همکاران (1994) حرکت برمید در خاک را تحت کشت گندم بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مدل CDE تعادلی در مقایسه با CDE غیرتعادلی برازش ضعیف‌تری بر داده‌های اندازه‌گیری ارائه می‌دهد. العبیدی و همکاران (1993) حرکت نمک‌ها در خاک را بدون استفاده از ردیاب و تنها با اندازه‌گیری قابلیت رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک بررسی کردند. برازش داده‌های اندازه‌گیری شده با مدل‌های CDE و SRM^5 نشان داد که مدل اول (CDE) در عمق‌های بالایی برآورد خوبی از حرکت املاح انجام می‌دهد، در حالی که مدل SRM در تمامی عمق‌ها پیش‌بینی مناسبی را از حرکت نمک‌ها ارائه می‌نماید. کاسبی و همکاران (1984) بیان داشتند که مدل MIM توانایی پیش‌بینی حرکت نمک‌ها در سرعت‌های زیاد یا جریان‌های ترجیحی را دارد و در واقع این مدل پدیده مذکور را در نظر می‌گیرد. همچنین، آن‌ها گزارش کردند که این مدل می‌تواند پدیده کشیدگی یا دنباله دار شدن⁶ را در حرکت املاح در خاک توصیف کند که دلیل آن در نظر گرفتن فرآیند انتقال توده‌ای

انتقال مواد شیمیایی از خاک به آب‌های زیرزمینی، تحت تاثیر ویژگی‌های خاک، مدیریت خاک، مدت زمان آبخوبی و سرعت فرایندهای انتقال است (گوئیس کوئیانی و همکاران، 1995). اگرچه آلودگی آب‌های زیرزمینی به‌وسیله نیترات می‌تواند از فرایندهای طبیعی ناشی شود، ولی عامل اصلی افزایش این آلودگی در اثر فعالیت‌های کشاورزی و مصرف کودهای نیتروژن‌دار است (ساتیا و یاداو، 1997). به دلیل تاثیر عوامل مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک بر حرکت برخی املاح به ویژه نیترات در خاک، بررسی چگونگی حرکت آن‌ها تحت تاثیر نفوذ آب در خاک دشوار است. بنابراین، پژوهش‌های زیادی انجام گرفته است تا بتوان از یونی که رفتاری شبیه نیترات در خاک دارد، برای بررسی حرکت و رفتار نیترات و دیگر آنیون‌ها استفاده نمود. یکی از آنیون‌های مناسب برای بررسی حرکت نمک‌ها و خصوصاً نیترات در خاک، یون برمید¹ (Br) می‌باشد (مارتنز و فرانکن‌برگر، 1992).

حرکت نمک‌ها در نیمرخ خاک تحت تاثیر نفوذ آب، از دیدگاه‌های متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته و به‌وسیله مدل‌های ریاضی گوناگونی تفسیر گردیده است. یکی از دشواری‌های کاربرد مدل‌ها، تخمین پارامترهایی است که در مدل به‌کار رفته و اغلب تعداد آن‌ها 3 و یا بیشتر می‌باشد (آموزگار و همکاران، 1983). به دلیل دشواری حل تحلیلی این مدل‌ها، نرم‌افزارهای رایانه‌ای مختلفی برای حل عددی آن‌ها ارائه شده است.

دقت برآورد مدل را معمولاً توسط انحرافات که در پیش‌بینی رفتار پدیده مورد نظر دارد، ارزیابی می‌کنند. خطاهای به وجود آمده ممکن است مربوط به برآورد مدل و یا مربوط به روش‌های اندازه‌گیری رفتار پدیده و دقت آن‌ها باشد. برای تهیه مدل‌های تحلیلی اغلب لازم است که از فرضیات ساده‌کننده‌ای استفاده شود. این فرضیه‌ها، اگرچه باعث سهولت استفاده از مدل و برآورد نتایج می‌گردند، ولی سبب ایجاد محدودیت و در نتیجه خطا در مدل می‌شوند و شخص استفاده‌کننده از مدل بایستی به این محدودیت‌ها واقف باشد (جینز و همکاران، 1988).

2. Stochastic model

3. Convection-dispersion equation

4. Two-region mobile and immobile model

5. Stochastic regional model

6. Tailing

1. Bromide

این پژوهش از عامل خاک‌ورزی در دو سطح استفاده شد. تیمارهای خاک‌ورزی شامل: 1- کم‌خاک‌ورزی³ شامل شخم سطحی توسط دیسک (عمق شخم 15 سانتی‌متر) همراه با دو دیسک سطحی (سبک) پس از شخم به منظور تسطیح زمین و خرد کردن کلوخه‌های خاک (T₁) و 2- خاک‌ورزی مرسوم⁴ شامل شخم عمیق توسط گاواهن برگردان‌دار (عمق شخم 30 سانتی‌متر) همراه با دو دیسک سبک به‌منظور تسطیح زمین و خرد کردن کلوخه‌های خاک (T₂) بود.

این پژوهش در دو سال متوالی در یک زمین مشخص و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار تحت کشت ذرت انجام گردید. در سال دوم نیز تیمارها همانند سال اول در همان بلوک‌ها و کرت‌ها به گونه‌ای یکسان اعمال گردید. فواصل بین کرت‌ها در هر بلوک 2 متر و فواصل بین بلوک‌ها 3 متر در نظر گرفته شد. ابعاد کرت‌ها 10 × 5 متر و هر بلوک در امتداد طولی دارای دو نوع خاک‌ورزی (مرسوم و کم‌خاک‌ورزی) بود. سپس بذر ذرت روی پشته‌ها به صورت ردیفی کشت گردید. در تیمار گاواهن برگردان‌دار که عمق شخم 30 سانتی‌متر بود، پس از تبدیل خاک به جوی و پشته، عمق خاک نرم در کف جوی 10 سانتی‌متر کاهش و ارتفاع خاک نرم پشته حدود 10 سانتی‌متر افزایش یافت. به گونه‌ای که پس از تبدیل زمین به جوی و پشته، در تیمار گاواهن برگردان‌دار، عمق خاک نرم از کف جوی 20 و در روی پشته 40 سانتی‌متر و در تیمار دیسک به ترتیب 10 و 25 سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. پیش از اجرای طرح از لایه‌های صفر تا 15، 15 تا 30، 30 تا 60، 60 تا 90 و 90 تا 120 سانتی‌متر نمونه‌های خاک در سه نقطه از مزرعه توسط مته نمونه‌گیری برای تعیین غلظت برمید اولیه در خاک برداشت شد. غلظت اولیه برمید در خاک ناچیز (حدود 3 میکروگرم در سانتی‌متر مکعب خاک) و تقریباً برابر خطای دستگاه بود. در گوشه هر کرت در سال دوم، کرت‌های کوچکی به ابعاد 2 × 2 متر (4 متر مربع) جدا شد که برای بررسی حرکت املاح در نظر گرفته شدند.

پخشیده¹ بین دو ناحیه رطوبتی می‌باشد. ناکابه و همکاران (1999) انتقال یون برمید در یک خاک لوم رسی شنی را در دو تیمار آبیاری قطره‌ای و غرقابی تحت سیستم بی خاک‌ورزی مطالعه نمودند. مرکز جرم² برومید در دو روش آبیاری قابل مقایسه بود. در روش آبیاری غرقابی مرکز جرم در مقایسه با آبیاری قطره‌ای بالاتر، ولی آبشویی برمید به عمق پایین‌تر از 90 سانتی‌متر تحت آبیاری غرقابی بیشتر بود.

بر اساس آن چه گفته شد، حرکت املاح در خاک (از جمله یون برمید) می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار گیرد که یکی از این عوامل نوع عملیات خاک‌ورزی است. با توجه به پژوهش‌های اندک در زمینه انتقال یون‌ها به‌ویژه به‌صورت طولانی مدت و در شرایط مزرعه و استفاده از مدل‌ها برای پیش‌بینی حرکت آن‌ها در خاک تحت مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی در ایران، هدف از انجام این تحقیق، پیش‌بینی حرکت برمید در خاک توسط مدل‌های حرکت املاح و بررسی انتقال مرکز جرم تحت تیمارهای مختلف خاک‌ورزی بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان واقع در روستای جوزدان (لورک) نجف‌آباد در 40 کیلومتری جنوب غربی اصفهان انجام گردید. منطقه مورد بررسی در عرض جغرافیائی 32 درجه و 32 دقیقه شمالی و طول جغرافیائی 51 درجه و 23 دقیقه شرقی قرار دارد. ارتفاع آن از سطح دریا 1630 متر و بر اساس تقسیم‌بندی کوپن دارای اقلیم نیمه‌خشک با تابستان‌های خنک و خشک است. متوسط بارندگی و دمای سالیانه منطقه به- ترتیب 140 میلی‌متر و 14/5 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول 1 نشان داده شده است.

این پژوهش در یک قطعه زمین که چهار سال (پیش از اجرای طرح) به‌صورت آیش بود و سال پیش از آیش کشت ذرت در آن انجام گرفته بود، اجرا شد. در

3. Reduced tillage

4. Conventional tillage

1. Diffusive mass transfer

2. Mass center

جدول 1: ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی قبل از اجرای طرح

لایه (cm)	بافت خاک	OM (%)	EC _e (dS m ⁻¹)	pH	آهک (%)
15-صفر	لوم رسی سیلتی	0/56	3/5	7/6	12
15-30	لوم رسی سیلتی	0/36	2/8	7/5	15
30-50	رسی سیلتی	0/20	2/5	7/5	12

تعیین شد. دامنه اندازه‌گیری برمید توسط این دستگاه از 5 میکرومول در لیتر تا یک مول در لیتر و زمان تعادل آن 1 دقیقه می‌باشد. دستگاه مورد استفاده پس از واسنجی به‌طور اتوماتیک غلظت یون برمید را مستقیماً در محلول اندازه می‌گیرد. کلیه محاسبات درون دستگاه انجام شده و واسنجی توسط محلول‌های بافر برمید با غلظت‌های صفر، 0/01، 0/1 و 1 مولار انجام گردید.

مرکز جرم مختصات منحنی توزیع غلظت برمید در برابر عمق خاک محاسبه شد. به این گونه که مقدار غلظت باقی‌مانده² برمید به‌عنوان متغیر x و عمق خاک به‌عنوان متغیر y در نظر گرفته شد. به منظور تعیین مرکز جرم می‌توان سطح زیر نمودارها را به چند شکل هندسی مشخص (مثلث، مستطیل، دایره و غیره) تقسیم نمود، سپس مختصات x و y مرکز جرم هر شکل با مساحت A_i ، با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌گردد (نقوی و همکاران، 1384). البته این محاسبات با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Excel انجام شد.

$$x = \frac{\sum x_i A_i}{\sum A_i}, \quad y = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i}$$

x_i و y_i مختصات مرکز جرم شکل‌های تقسیم شده هستند و اندیس i مربوط شماره‌ی شکل می‌باشد. بدین معنی که اگر مساحت زیر منحنی به 5 شکل هندسی تقسیم شود، اندیس i از 1 تا 5 تغییر می‌نماید. در شکل 1، سطح زیر منحنی به شکل‌های منظم هندسی تقسیم شده است که به‌عنوان مثال، شکل شماره 2 یک دوزنقه است که دارای مساحت A_2 و مختصات مرکز جرم x_2 و y_2 می‌باشد و با استفاده از مشخصات این شکل‌ها و روابط بالا، مختصات مرکز جرم سطح زیر منحنی به‌دست می‌آید.

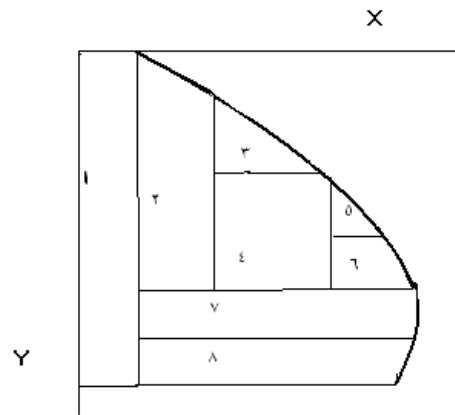
بدیهی است که تمام عملیاتی که روی کرت‌های اصلی انجام شد (مانند خاک‌ورزی و کشت گیاه)، روی کرت‌های کوچک‌تر نیز انجام گرفت و فقط به کرت‌های کوچک مقدار 200 گرم برمید پتاسیم برای بررسی حرکت برمید در خاک اضافه گردید. این مقدار معادل 336 کیلوگرم در هکتار برمید خالص (500 کیلوگرم در هکتار برمید پتاسیم) می‌باشد. برمید پتاسیم در کف جوی‌ها به‌صورت کاملاً یکنواخت و به فرم محلول (با غلظت 16/67 گرم در لیتر) توسط آب‌پاش اضافه شد. برای کنترل دقیق مقدار آب در بررسی حرکت برمید، آبیاری کرت‌های کوچک (2×2 متر) توسط آب‌پاش با حجم معین به‌صورت دستی و یکنواخت انجام گردید. مقدار تبخیر روزانه و متوسط تبخیر در طول فصل رشد پس از اضافه کردن برمید به خاک توسط تشتک تبخیر تعیین گردید. برای بررسی حرکت برمید در خاک، نمونه‌برداری در سه نوبت، 2، 5 و 10 آبیاری به‌ترتیب معادل 126، 315 و 630 میلی‌متر آب آبیاری در طول فصل رشد ذرت از پنج لایه صفر تا 15، 15 تا 30، 30 تا 60، 60 تا 90 و 90 تا 120 سانتی‌متر از کف جوی انجام گرفت و نمونه‌های خاک برای اندازه‌گیری مقدار برمید و رطوبت به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های خاک پس از خشک شدن در هوا، کوبیده و از الک 2 میلی‌متر عبور داده شدند. سپس 10 گرم خاک توزین و به هر نمونه 50 میلی‌لیتر آب مقطر و 2 میلی‌لیتر نترات پتاسیم 2/5 مولار (برای تثبیت قدرت یونی) اضافه و سوسپانسیون حاصل به‌مدت 30 دقیقه تکان داده شد. سپس به‌مدت 24 ساعت در آزمایشگاه به حالت سکون قرار داده شد و پس از آن سانتریفوژ گردید و محلول صاف رویی برای اندازه‌گیری غلظت برمید جدا شد. غلظت برمید با استفاده از الکتروود انتخاب‌گر¹ برمید،

غلظت انجام می‌گیرد. هم‌چنین، فرض می‌شود فرایند جذب در دو محیط متحرک و غیر متحرک نیز به صورت ناگهانی بوده و جذب به صورت خطی می‌باشد. اگر در مدل SCDE ضریب پخشیدگی-انتشار را صفر در نظر بگیریم، حرکت املاح به صورت توده‌ای فرض شده و مدل به انتقال منطقه‌ای تبدیل می‌شود. شرح مفصل‌تر مدل‌های مذکور و روش اندازه‌گیری پارامترهای آن‌ها در منابع آورده شده است که برای تعیین پارامترهای مدل در این پژوهش از آن‌ها استفاده گردید (صیاد، 1377؛ شعبان‌پور شهرستانی، 1378 و وان‌گنوختن و ویرنگا، 1976). در جدول 2 مقادیر پارامترهای ورودی مدل آورده شده‌اند.

نتایج و بحث

تاثیر پدیده آبشویی بر مختصات مرکز جرم برمید در دو تیمار خاک‌ورزی

جدول 3 مختصات مرکز جرم برمید را در سه مرحله آبیاری و نمونه‌برداری تحت سیستم کم خاک‌ورزی نشان می‌دهد. مولفه X نشان دهنده غلظت برمید و مولفه Y نمایانگر عمق مرکز جرم می‌باشد. با افزایش تعداد آبیاری در مرحله دوم، مولفه X در مقایسه با مرحله اول آبیاری کاهش یافته است، ولی این کاهش از نظر آماری در سطح 5 درصد معنی‌دار نبود. در مقابل مولفه Y (عمق مرکز جرم) پس از 5 بار آبیاری در مرحله دوم به‌طور معنی‌داری نسبت به مرحله اول (2 آبیاری) افزایش یافت. بنابراین، با افزایش مقدار آب آبیاری در مرحله دوم از غلظت ردیاب در پروفیل خاک کاسته شد که این کاهش از نظر آماری (در سطح 5%) معنی‌داری نبود. هم‌چنین، عمق یا مختصات عمودی مرکز جرم ردیاب همراه با افزایش دفعات آبیاری به سمت اعماق پایین‌تر نیم‌رخ خاک حرکت کرده است. در مرحله سوم نمونه‌برداری (پس از 10 آبیاری) نیز مولفه X نسبت به مراحل قبلی کاهش معنی‌داری پیدا نکرده است، در حالی‌که مولفه Y افزایش معنی‌داری در مقایسه با دو مرحله قبلی داشته است. بدین معنی که پس از 10 بار آبیاری مرکز جرم ردیاب به اعماق پایین‌تر انتقال یافته است.



شکل 1: شکل شماتیک محاسبه مرکز جرم سطح زیر یک منحنی

پس از تعیین غلظت برمید باقی‌مانده در عمق‌های مورد نظر خاک در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری، داده‌های به‌دست آمده برای هر تیمار و هر زمان نمونه‌گیری بر اساس عمق خاک پردازش شدند. سپس نتایج به‌دست آمده با استفاده از برنامه کامپیوتری CXTFIT2 برازش گردیدند. این نرم‌افزار قادر است چگونگی حرکت املاح در خاک را به صورت حل مستقیم¹ و حل معکوس² تجزیه و تحلیل نماید. چهار مدل حرکت املاح در این برنامه گنجانده شده است که توسط آن‌ها داده‌های اندازه‌گیری شده مورد برازش قرار گرفتند. مدل‌های مورد استفاده عبارت بودند از: 1- مدل CDE معین یا DCDE³، 2- مدل نامعین یا SCDE⁴، 3- مدل دوناچه‌ای رطوبت متحرک و رطوبت غیر متحرک یا MIM 4- مدل انتقال منطقه‌ای یا SRM که چهار مدل فوق در نرم افزار CXTFIT موجود است. فرق مدل CDE معین با نامعین این است که در اولی ضریب پخشیدگی ثابت و به صورت یک مقدار معین به مدل داده می‌شود، ولی در دومی، خود نرم‌افزار با توجه به پارامترهای دیگر داده شده و داده‌های اندازه‌گیری شده، بهترین مقدار را تخمین می‌زند. در مدل MIM فاز مایع (محلول) در محیط متخلخل به دو بخش متحرک و غیر متحرک تقسیم می‌شود. حرکت ماده مورد نظر بین این دو بخش محلول بر اساس شیب

1. Direct solution
2. Inverse solution
3. Deterministic convection dispersion equation
4. Stochastic Convexion Dispersion Equation

جدول 2: پارامترهای مهم ورودی مدل‌ها (رطوبت باقی‌مانده همان مقدار رطوبت هواخشک است و هدایت آبی اشباع خاک به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد)

متوسط تبخیر روزانه (mm/day)	مقدار آب آبخوئی (mm)			غلظت برمید اضافه شده (g/L)	هدایت آبی اشباع (cm/hr)	رطوبت باقی‌مانده (% حجمی)	رطوبت اشباع (% حجمی)
6/5	10 آبیاری	5 آبیاری	2 آبیاری	16/7	6/5	3	46

جدول 3: مقایسه میانگین مختصات مرکز جرم برمید در خاک در 3 مرحله آبخوئی تحت سیستم کم‌خاک‌ورزی*

مرحله آبخوئی	x غلظت ($\mu\text{g cm}^{-3}$)	y عمق (cm)
2 آبیاری	14/5a	41a
5 آبیاری	12/1a	48b
10 آبیاری	10/3a	54/1c

* در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه می‌باشند، اختلاف معنی‌داری ندارند (آزمون دانکن در سطح آماری 5%).

غلظت ردیاب پس از 10 بار آبیاری کاهش معنی‌داری در مقایسه با 5 بار آبیاری داشته و از طرف دیگر مرکز جرم برمید به عمق پایین‌تری در نیم‌رخ خاک انتقال یافته است. پژوهش‌های آگوس و کاسل (1992) نشان داد که با افزایش مقدار آب به کار رفته به منظور آبیاری، عمق مرکز جرم برمید افزایش یافت.

نتایج فوق نشان می‌دهد که در سیستم خاک‌ورزی مرسوم حرکت مرکز جرم ردیاب به سمت عمق‌های پایین‌تر خاک در مقایسه با سیستم کم‌خاک‌ورزی پس از 10 بار آبیاری بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش مقدار آب آبیاری تا حد 630 میلی‌متر، در سیستم گاواهن برگردان‌دار عمق مرکز جرم ردیاب در مقایسه با دیسک سطحی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. در صورتی که در مراحل اول و دوم آبیاری (126 و 315 میلی‌متر آب) تفاوت چشم‌گیری بین دو سیستم خاک‌ورزی از نظر عمق مرکز جرم برمید وجود ندارد. آگوس و کاسل (1992) نشان دادند که با کاربرد حدود 300 میلی‌متر آب تفاوت چندانی از نظر عمق مرکز جرم برمید بین خاک‌ورزی سطحی (دیسک) و خاک‌ورزی عمیق دیده نشد، ولی با افزایش مقدار آب آبیاری تا حد 500 میلی‌متر و بیشتر، این اختلاف چشم‌گیر شد. به‌گونه‌ای که عمق مرکز جرم ردیاب در سیستم خاک‌ورزی عمیق بیشتر از خاک‌ورزی سطحی بود.

مختصات مرکز جرم برمید در سه مرحله آبیاری تحت سیستم خاک‌ورزی مرسوم در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 4: مقایسه میانگین مختصات مرکز جرم برمید در خاک (به صورت دو به دو) در 3 مرحله آبخوئی تحت سیستم خاک‌ورزی مرسوم*

مرحله آبخوئی	x غلظت ($\mu\text{g cm}^{-3}$)	y عمق (cm)
2 آبیاری	16/2a	40/3a
5 آبیاری	13/7a	47/5b
10 آبیاری	7/1b	60/5c

* در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه می‌باشند، اختلاف معنی‌داری ندارند (آزمون دانکن در سطح آماری 5%).

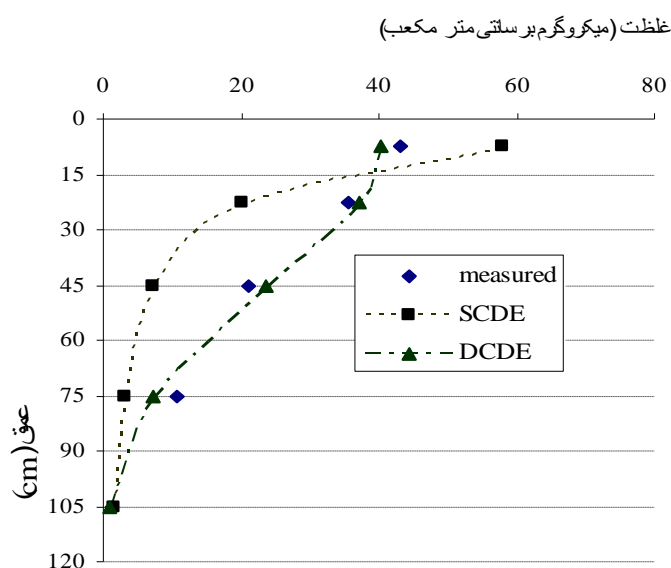
در مرحله دوم نمونه‌برداری (5 آبیاری) مولفه x مرکز جرم ردیاب در مقایسه با مرحله اول کاهش یافته است که این کاهش از نظر آماری معنی‌دار نیست. همچنین، در این مرحله افزایش معنی‌داری در مقدار مولفه y نسبت به مرحله اول دیده می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش مقدار آبیاری از غلظت برمید کاسته شده و عمق مرکز جرم افزایش یافته است. پس از 10 بار آبیاری، کاهش معنی‌داری در مولفه x دیده می‌شود و مولفه y نیز نسبت به مراحل قبلی (مرحله اول و دوم) به گونه معنی‌داری افزایش داشته است. بدین مفهوم که

یکنواختی نسبتاً خوبی بود، زیرا از نظر بافت در تمام لایه‌های نیمرخ خاک تقریباً مشابه و ریزبافت بوده و دارای ساختمان متراکم و توده‌ای در خاک می‌باشد. در تیمار دیسک سطحی نیز به هم خوردگی خاک کم بوده و انتظار می‌رود که مدل DCDE برازش مطلوبی از داده‌ها داشته باشد. پس از 5 آبیاری در مرحله دوم (315 میلی‌متر آب) مدل SCDE برازش خوبی از روند حرکت برومید در خاک ارائه ننموده است. در این مرحله نیز برازش مدل DCDE در مقایسه با SCDE بهتر بود، به گونه‌ای که مقدار R^2 حدود 60 درصد و SSQ حدود نصف مدل اول می‌باشد (شکل 2). در مرحله سوم نمونه‌برداری (10 آبیاری) پیش‌بینی هر دو مدل از روند حرکت برومید ضعیف بود. شکل 4 پیش‌بینی دو مدل مذکور را در مرحله سوم نمونه‌برداری و تحت سیستم کم‌خاک‌ورزی نشان می‌دهد. در برخی از پژوهش‌ها ذکر شده که با گذشت زمان و افزایش آبیاری، برازش مدل CDE بر داده‌های اندازه‌گیری ضعیف‌تر می‌شود (باترز و همکاران، 1989). در این پژوهش نیز با افزایش آبشویی به ویژه در مورد مدل DCDE، برازش مدل با خطای بیشتری مواجه گردید.

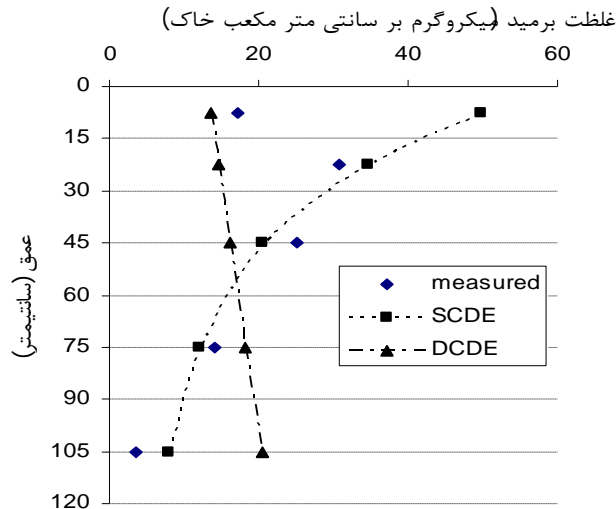
پیش‌بینی حرکت برومید توسط مدل CDE در سیستم کم‌خاک‌ورزی

جدول 5 مقادیر ضریب تبیین و مجموع مربعات خطا را در هر دو تیمار کم‌خاک‌ورزی و برای مقادیر مختلف آب آبیاری نشان می‌دهد. در تیمار کم‌خاک‌ورزی، برازش مدل‌های CDE نامعین (SCDE) و معین (DCDE) در اولین مرحله نمونه‌برداری و یا پس از آبیاری با 123 میلی‌متر آب در شکل 2 نشان داده شده است. مدل DCDE برآورد بسیار خوبی از داده‌های اندازه‌گیری داشته است، به گونه‌ای که R^2 نزدیک به یک بوده و مجموع مربعات خطا (SSQ) نیز در مقایسه با مدل SCDE بسیار کمتر است. اگرچه مقدار R^2 در مدل SCDE نسبتاً بالا بود، ولی مقدار SSQ حدود 24 برابر مدل DCDE به دست آمد. بنابراین مدل CDE معین برازش بسیار بهتری از حرکت برومید در مقایسه با مدل CDE نامعین ارائه کرده است.

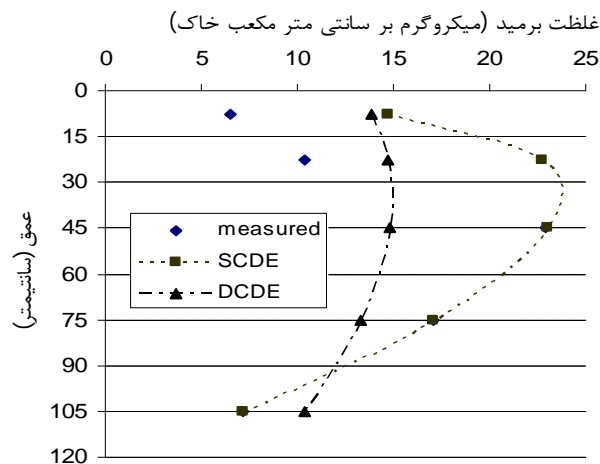
مدل CDE بر اساس ضریب انتشار-پخشیدگی (انتشار هیدرودینامیک و پخشیدگی مولکولی) عمل می‌کند و محققان گزارش کرده‌اند که این مدل برای بررسی حرکت املاح در خاک‌های همگن مناسب است (لی و قدرتی، 1994). خاک مورد بررسی دارای



شکل 2: پیش‌بینی حرکت برومید توسط مدل‌های SCDE و DCDE در سیستم کم‌خاک‌ورزی پس از 2 آبیاری



شکل 3: پیش‌بینی حرکت برمید توسط مدل‌های SCDE و DCDE در سیستم کم خاک‌ورزی پس از 5 آبیاری



شکل 4: پیش‌بینی حرکت برمید توسط مدل‌های SCDE و DCDE در سیستم کم خاک‌ورزی پس از 10 آبیاری

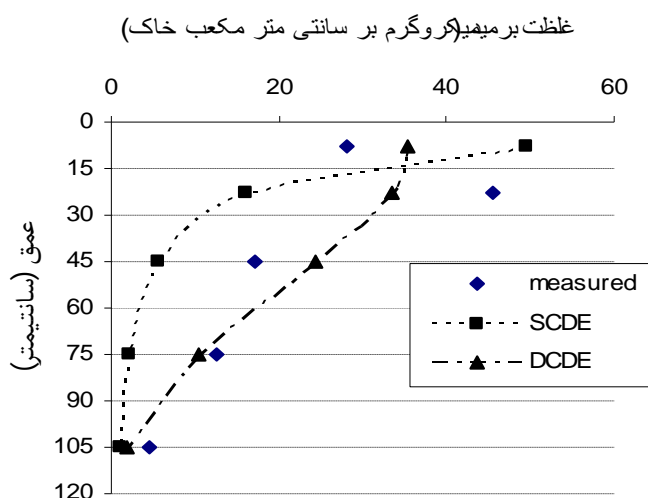
جدول 5: مقادیر ضریب تبیین (R^2) و مجموع مربعات خطا (SSQ) برای دو مدل CDE معین (DCDE) و نامعین (SCDE) در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی و مقادیر آب آبیاری

SCDE مدل		DCDE مدل		تیمار خاک‌ورزی کم خاک‌ورزی
SSQ	R^2	SSQ	R^2	
691/8	0/74	34/1	0/98	2 آبیاری
1123	0/26	658/6	0/58	5 آبیاری
217/4	0/41	163/5	0/23	10 آبیاری
خاک‌ورزی مرسوم				
1583	0/25	256/5	0/75	2 آبیاری
1760	0/05	638/7	0/26	5 آبیاری
44/9	0/83	25/8	0/71	10 آبیاری

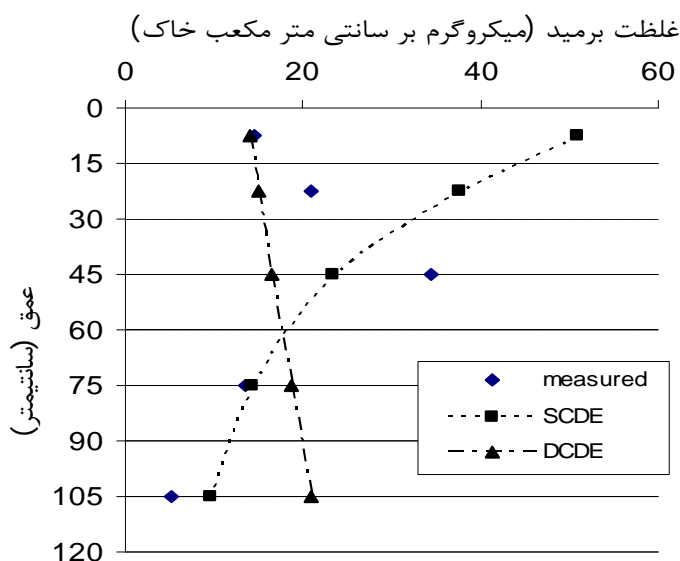
پیش‌بینی حرکت برمید توسط مدل CDE در سیستم خاک‌ورزی مرسوم

شکل 5 پیش‌بینی حرکت برمید در نیمرخ خاک را پس از مرحله اول آبیاری نشان می‌دهد. مدل SCDE برازش بسیار ضعیفی از حرکت برمید در خاک داشته، به گونه‌ای که مقدار R^2 برابر 25 درصد و SSQ بیش از 1500 می‌باشد. در مقابل مدل DCDE برآورد خوبی از حرکت ردیاب در خاک داشته که R^2 برابر 75 درصد و SSQ برابر 256/6 گویای این گفته است. در مرحله دوم

نمونه‌برداری، برازش حرکت برمید در خاک توسط مدل SCDE بسیار ضعیف بوده، به گونه‌ای که کمترین مقدار R^2 و بیشترین مقدار SSQ را در بین تمام برازش‌های انجام شده به خود اختصاص داده است. همچنین، مدل DCDE نیز نتوانسته است روند حرکت برمید در خاک را به خوبی برازش نماید، اگر چه نسبت به مدل SCDE کارایی بهتری داشته است. شکل 6 برازش دو مدل فوق را پس از 5 آبیاری نشان می‌دهد.



شکل 5: پیش‌بینی حرکت برمید توسط مدل‌های SCDE و DCDE در سیستم خاک‌ورزی مرسوم پس از 2 آبیاری



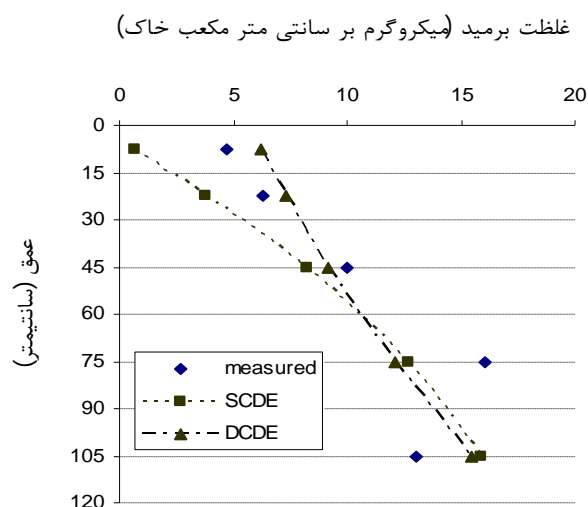
شکل 6: پیش‌بینی حرکت برمید توسط مدل‌های SCDE و DCDE در سیستم خاک‌ورزی مرسوم پس از 5 آبیاری

شده است. احتمالاً با توجه به یکنواختی غلظت در عمق‌های نیمرخ خاک، هر دو مدل DCDE و SCDE توانسته‌اند برازش خوبی بر داده‌ها نشان دهند.

با توجه به مقدار SSQ و R^2 داده‌ها، برازش مدل‌ها از حرکت برمید در خاک، تحت سیستم کم‌خاک‌ورزی بهتر و با دقت بالاتری در مقایسه با سیستم خاک‌ورزی مرسوم انجام گرفته است. علت آن شاید به‌هم‌خوردگی و غیر یکنواختی بیشتر خاک توسط خاک‌ورزی مرسوم (به‌دلیل شخم عمیق‌تر) باشد. بدین مفهوم که در سیستم خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی عمق به‌هم‌خوردگی خاک از کف جوی (محل افزودن برمید) به ترتیب 20 و 10 سانتی‌متر می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، هر قدر خاک دست‌نخورده و همگن باشد، دقت برازش مدل CDE بر حرکت ردیاب بالاتر است. در مقابل در مرحله سوم نمونه‌برداری، دقت برآورد مدل در خاک‌ورزی مرسوم نسبت به سیستم کم‌خاک‌ورزی بیشتر بود که علت آن شاید مربوط به پخش و یکنواختی بیشتر غلظت برمید در عمق نیمرخ خاک و در نتیجه کاهش چولگی منحنی تحت سیستم خاک‌ورزی مرسوم پس از 10 بار آبیاری باشد. نتیجه کلی دیگر این است که در هر دو تیمار خاک‌ورزی و در هر سه مرحله نمونه‌برداری، برازش حرکت برمید در خاک توسط مدل DCDE نسبت به مدل SCDE دقیق‌تر و بهتر است.

در آخرین مرحله نمونه‌برداری (پس از 10 آبیاری) برعکس مرحله قبلی هر دو مدل برازش خوبی را بر داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت برمید داشته و مقدار R^2 برای دو مدل SCDE و DCDE به ترتیب برابر 80% و 70% می‌باشد. با وجود این که مقدار R^2 برای مدل نامعین بیشتر از مدل معین است، ولی مقدار SSQ کمتر مدل DCDE نشان دهنده انحراف کمتر از داده‌های واقعی و بنابراین برازش بهتر آن بر داده‌ها است. شکل 7 نشان‌دهنده پیش‌بینی حرکت برمید در عمق خاک پس از 10 آبیاری می‌باشد.

در مورد تیمار دیسک سطحی مشاهده گردید که با گذشت زمان با افزایش دفعات آبیاری، پیش‌بینی مدل از حرکت ردیاب با دقت کمتری انجام گرفت. در تیمار گاواهن برگردان‌دار نیز به مرور با افزایش دفعات آبیاری تا مرحله دوم نمونه‌برداری (5 آبیاری)، دقت مدل در برازش روند حرکت برمید در خاک کاهش یافت، ولی پس از 10 آبیاری یعنی در آخرین مرحله نمونه‌برداری این پیش‌بینی با دقت بالایی انجام گرفت. دلیل این امر احتمالاً مربوط به شستشوی بیشتر برمید در سیستم خاک‌ورزی مرسوم می‌باشد. آبخویی زیادتر موجب یکنواختی بیشتر غلظت برمید در عمق‌های مختلف نیمرخ خاک شده است. به گونه‌ای که تجمع زیاد ردیاب در یک یا دو عمق معین دیده نمی‌شود و در واقع چولگی منحنی کم شده و برمید در طول نیمرخ خاک پخش



شکل 7: پیش‌بینی حرکت برمید توسط مدل‌های SCDE و DCDE در سیستم خاک‌ورزی مرسوم پس از 10 آبیاری

پیش‌بینی حرکت برمید توسط مدل MIM و مدل انتقال منطقه‌ای

در هر دو تیمار خاک‌ورزی و در همه مراحل نمونه‌برداری، دو مدل MIM و SRM برازش خوبی بر روند حرکت برمید در عمق خاک در این پژوهش نشان دادند، به گونه‌ای که همبستگی داده‌های اندازه‌گیری با داده‌های برازش یافته بسیار کم و انحرافات (SSQ) بسیار زیاد بود. لی و قدرتی (1994) اظهار داشتند که مدل MIM در صورت وجود کانال‌های ناشی از رشد ریشه گیاهان و حاکم بودن جریان‌های ترجیحی برازش خوبی از حرکت املاح در خاک ارائه می‌نماید. هم‌چنین، کاسبی و همکاران (1984) گزارش کردند که مدل MIM توانایی پیش‌بینی حرکت املاح را در سرعت‌های زیاد یا جریان‌های ترجیحی دارد. در حالی که مدل CDE به منظور پیش‌بینی حرکت املاح در خاک تحت سرعت‌های پایین و شدت جریان کم مناسب می‌باشد. خاک مورد بررسی نیز دارای بافت ریز و ساختمان فشرده یا توده‌ای و یکنواخت بوده و فاقد جریان‌های سریع و ترجیحی می‌باشد. به گونه‌ای که نفوذپذیری خیلی کمی داشته (سرعت حرکت آب در خاک کم است) و بنابراین مدل CDE مناسب‌تر است. از طرفی مدل MIM، وقتی که توزیع املاح در خاک حالت کشیدگی داشته باشد مناسب است، در حالی که مدل CDE توزیع سیگموئیدی (S- شکل) را به خوبی برازش می‌نماید (وان‌گنوختن، 1976). توزیع برمید در نیمرخ خاک در این بررسی نیز بیشتر حالت سیگموئیدی داشت و بنابراین برازش مدل CDE بهتر بود. مدل انتقال منطقه‌ای، مدلی است که حرکت املاح در خاک را توسط جریان روان یا توده‌ای در نظر می‌گیرد. جریان روان املاح از منافذ درشت خاک انجام می‌گیرد که معمولاً درصد کمی از کل منافذ خاک را شامل می‌شوند (بوما و وستن، 1979). اگر در مدل SCDE مقدار ضریب پخشیدگی (D) را نزدیک صفر در نظر بگیریم، جریان املاح فقط به صورت جریان روان در نظر گرفته می‌شود و بنابراین به مدل انتقال منطقه‌ای تبدیل می‌شود (شعبان‌پور شهرستانی، 1378).

در این پژوهش خاک دارای بافت ریز و ساختمان ضعیف و متراکم بوده و در نتیجه مقدار منافذ درشت و پیوسته در این خاک کم می‌باشد و جریان روان چندان ارجحیت ندارد. پس با توجه به گفته‌های فوق انتظار می‌رود که مدل انتقال منطقه‌ای پیش‌بینی دقیق و مناسبی از حرکت برمید در خاک نداشته باشد. در کل برآورد این مدل نسبت به داده‌های واقعی به‌ویژه در عمق‌های سطحی بسیار نامناسب بود.

نتیجه‌گیری

محاسبه مرکز جرم برمید در دو سیستم خاک‌ورزی نشان داد که با افزایش مقدار آب آبیاری، مؤلفه X مرکز جرم (غلظت برمید) کاهش و مؤلفه Y مرکز جرم (عمق) افزایش یافته است. مقدار کاهش مؤلفه X و افزایش مؤلفه Y مرکز جرم در سیستم خاک‌ورزی مرسوم در مقایسه با کم‌خاک‌ورزی بیشتر بود که نشان‌دهنده شستشوی بیشتر برمید در خاک‌ورزی مرسوم می‌باشد. مقایسه پیش‌بینی توزیع غلظت برمید در خاک توسط مدل CDE با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد که نوع معین این مدل (DCDE) نسبت به نامعین آن (SCDE) برازش دقیق‌تری از حرکت برمید انجام داد. در سیستم کم‌خاک‌ورزی با افزایش آبشویی برمید، مدل CDE برازش ضعیف‌تری از داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد. در برابر در خاک‌ورزی مرسوم مدل CDE پس از 10 آبیاری برازش خوبی از داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه نمود. در مراحل اول و دوم نمونه‌برداری، برازش مدل CDE بر حرکت برمید در خاک تحت تیمار کم‌خاک‌ورزی بهتر از تیمار خاک‌ورزی مرسوم بود. مدل MIM و مدل انتقال منطقه‌ای برازش مطلوبی از روند حرکت برمید در خاک ارائه ندادند. به‌طور کلی با توجه به نتایج این پژوهش، می‌توان گفت آبشویی تأثیر زیادی بر حرکت آنیون‌هایی مثل برمید (شاخص برای یون‌هایی مثل نیترات و کلرید) دارد و مدل CDE برای خاک‌های یکنواخت به‌منظور پیش‌بینی حرکت نمک‌ها مناسب است.

منابع

- شعبان‌پور شهرستانی، م. 1378. حرکت املاح در شرایط مزرعه. پایان‌نامه دکتری خاکشناسی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- صیاد، غ. 1377. تاثیر مواد آلی بر روند اصلاح و بهسازی خاک‌های شور و قلیا. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- نقوی، ه.، حاج‌عباسی، م. ع. و افیونی، م. 1384. تاثیر کود گاوی بر برخی خصوصیات فیزیکی خاک و ضرایب هیدرولیکی و انتقال برمید در یک خاک لوم شنی در کرمان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد سوم ص 102-93.
- Agus, F. and Cassel, D. K. 1992. Field-scale bromide transport as affected by tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 254-260.
- Amoozegar, A. A, Warrick, A. W. and Fuller, W. H. 1983. A simplified model for solute movement through Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1047-1049.
- Bouma, J. and Wosten, J. H. M. 1979. Flow patterns during extended saturated flow in two undisturbed swelling clay soils with different macrostructures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 16-22.
- Butters, G. L., Jury, W. and Ernest, F. F. 1989. Field scale transport of bromide in an unsaturated soil. 1. Experimental methodology and results. *Water Resour. Res.*, 25: 1575-1581.
- Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B. and Ginn, T. R. 1984. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Res.*, 20: 682-690.
- Eloubaidy, A. F. and Hussain, S. M. 1993. Field evaluation of desalination models. *J. Agric. Wat. Magt.*, 24: 1-13.
- Giusquiani, P. L., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D., and Beneti, A. 1995. Urban waste compost effects on physical, chemical, biological soil properties. *J. Environ, Qual.* 24: 175-182.
- Jaynes, D. B., Rice, R. C. and Bowman, R. S. 1988. Independent calibration of a mechanistic stochastic-model for field-scale solute transport under flood irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1541-1546.
- Li, Y. and Ghodrati, M. 1994. Preferential transport of nitrate through soil columns containing root channels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 653-659.
- Martens, D. A. and Frankenberger, W. T. 1992. Modification of infiltration rates in an organic - amended irrigated soil. *Agron. J.*, 84(4): 707-717.
- Nachabe, M. H., Ahuja, L. R. and Butters, G. L. 1999. Bromide transport under sprinkler and flood irrigation for no-till soil condition. *J. of Hydrology*, 214: 8-17.
- Satya, N. and Yadav. 1997. Formulation and estimation of nitrate-nitrogen leaching from corn cultivation. *J. Environ. Qual.* 26: 808-814.
- Vanderborght, J., Gonzalez, C., Vanclooster, M., Mallants, D., and Feyen, J. 1997. Effects of soil type and water flux on solute transport. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 372-389.
- Van Genuchten, M. Th. and Wierenga, P. J. 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media I. Analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 473-480.
- Yasuda, H., Berndtsson, R., Bahri, A. and Jinno, K. 1994. Plot-scale solute transport in a semiarid agricultural soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 1052-1060.

Simulation of Bromide Leaching in a Silty Clay Loam Soil Under Different Tillage Systems

Shirani¹, H., Afyuni², M., Hajabbasi², M. A. and Hemmat³, A.

Abstract

Transportation of chemicals from soil surface toward aquifers is influenced by soil properties, tillage management, leaching and the rate of transportation processes. Models substantially are useful for studying and applying management and it is possible to use them in planning special experiments on water and solute transport. The study was performed in two consecutive years. Different tillage treatments including disk harrowing + two disk harrowing as reduced tillage (15 cm plowing depth) (T₁) and moldboard plowing + two disk harrowing as conventional tillage system (30 cm plowing depth) (T₂) were used. The above mentioned treatments were done in a randomized complete block design with 3 replications and under corn cultivation for two years. To study bromide transport through the soil, potassium bromide with concentration of 16.67 g/l was sprayed uniformly on the soil surface. Then, bromide transport was predicted by solute transport models. The results showed that with increase of leaching, bromide mass center was moved to deeper layers and this kind of movement can be observed in T₂ with more intensity. Comparison between the distributions of bromide concentration by deterministic convection-dispersion equation (DCDE) with measured data revealed that DCDE is more careful in prediction than stochastic CDE (SCDE). In T₁, with increase of bromide leaching, CDE models fitted measured data poorly as well. On the opposite side, in T₂, CDE models could present appropriate fitting of measured data (after 10 irrigations or 630 mm water). After second and fifth irrigation (126 and 315 mm water), the fitting of CDE models on bromide leaching in the soil under T₁ was better than T₂. Two-region mobile and immobile model (MIM) and stochastic regional model (SRM) did not present ideal fitting on the bromide transport in soil.

Keywords: Simulation, Tillage, Bromide, Mass center, Model

1. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan.

2. Professors, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan.

3. Professor, Department of Farm Machinery, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan.

