

## مقایسه سه مدل انتقال املاح با استفاده از ردیاب برماید

محمود شعبانپور شهرستانی<sup>۱</sup>

### چکیده

تجمع و حرکت املاح در خاک و مدلسازی این حرکت موضوعی است که در سالهای اخیر بسیار مورد توجه بوده و مطالعات زیادی در این مورد صورت گرفته است. مدل‌های انتقال املاح کاربردهای زیادی در بررسی چگونگی حرکت عناصر غذایی در خاک، انتقال آلاینده‌ها و آبتیوی خاکهای شور دارند. کاربرد عملی این مدل‌ها می‌تواند باعث سادگی محاسبات، سرعت کار و صرفه جویی در هزینه‌های آزمایشگاهی شود و امکان محاسبه غلظت ماده مورد نظر در هر عمق و زمان دلخواه بدین طریق وجود دارد. در این تحقیق حرکت برماید<sup>۲</sup> (به عنوان ردیاب) در مزرعه تحت سه کشت ذرت، گندم و یونجه با یک تیمار شاهد در سه تکرار با طرح بلوکهای کامل تصادفی در دو سال متوالی مورد بررسی قرار گرفت. برماید به صورت برماید پتاسیم به مقدار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار برماید خالص در آب حل و بصورت یکنواخت به سطح کرت‌های آزمایشی اضافه شد و با ۱/۵ سانتیمتر آبیاری بارانی وارد خاک گردید. آبتیوی در سال اول در ۸ مرحله انجام شد و در هر مرحله ۸/۵ سانتیمتر آب به صورت غرقابی به زمین اضافه گردید. در سال دوم اضافه کردن ردیاب مشابه سال اول صورت گرفت و آبتیوی در ۹ مرحله انجام شد و در هر مرحله ۱۰ سانتیمتر آب به زمین اضافه گردید. نمونه برداری به وسیله مته از عمق‌های ۳۰-۶۰، ۹۰-۳۰، ۶۰-۱۲۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتیمتر چند روز پس از هر مرحله آبتیوی انجام گردید. غلظت برماید در نمونه‌های خاک به وسیله الکتروود انتخابگر اندازه گیری شد. رطوبت خاک با استفاده از نوترون متر اندازه گیری و پس از محاسبه تخییر واقعی از سطح خاک طی هر مرحله آبتیوی مقدار آب خالص اضافه شده به کرت‌ها<sup>۳</sup> محاسبه گردید. از برنامه CXTFIT و سه مدل جریان روان - انتشار (CDE)؛ انتقال ناحیه ای (RSM) و تابع انتقال (TFM)<sup>۴</sup> برای مدلسازی حرکت برماید استفاده شد. نتایج نشان داد مدل‌های CDE, TFM, RSM به ترتیب بهترین برآورد را از حرکت و تجمع برماید در خاک داشتند. در مدل TFM از تأثیر انتشارپذیری<sup>۵</sup> صرف نظر شده است بنابراین نزدیک بودن برآوردهای دو مدل اول نشان می‌دهد تأثیر انتشارپذیری در فرآیند انتقال نسبت به سرعت جریان بسیار کمتر است و غالباً می‌توان از تأثیر آن در شرایط مزرعه صرف نظر کرد. با مقایسه مقادیر همانند سازی شده غلظت با مقادیر اندازه گیری شده کارایی مدل‌ها به اثبات می‌رسد. خطاهای حاصل با توجه به تغییرات ناحیه ای<sup>۶</sup> زیاد در محیط خاک منطقی به نظر می‌رسد. سرعت جریان در تیمارهای ذرت، گندم و یونجه در سال دوم به ترتیب ۵۴.۸۶ و ۱۲۱ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت. انتشارپذیری نیز در تیمارهای یونجه و ذرت در سال دوم به ترتیب ۳۳۰ و ۴۳۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت. افزایش سرعت جریان و انتشار پذیری بیانگر افزایش جریانهای ترجیحی<sup>۷</sup> در تیمارهای تحت کشت در سال دوم می‌باشد که می‌تواند در اثر ریشه‌های عمیق و پیوسته گیاهان و تأثیر خلل و فرج حاصل از ریشه‌های پوسیده گیاهان سال قبل باشد. استفاده از مدل TFM در کارهای اجرایی و مدل RSM در کارهای علمی در شرایط مشابه میتواند مورد توجه و توجیه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های CDE, RSM, TRM، انتشارپذیری، جریان ترجیحی

- 
- |                           |                                   |                       |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 1. استادیار دانشگاه گیلان | 4. Convective Dispersive Equation | 7. Dispersivity       |
| 2. Brmide (as a Tracer)   | 5. Regional Stochastic Model      | 8. Spatial Variations |
| 3. NetWater Applied (NWA) | 6. Transfer Function Model        | 9. Preferential Flow  |

## مقدمه

آزمایشهای مزرعه ای برآورد خوبی از انتقال املاح داشت (۱۲). جوری و اسپوزیتو (۱۹۸۵) مدلهای TFM و CDE را در شرایط مزرعه با استفاده از سه روش آماری واسنجی و برآورد این مدلها را با هم مقایسه نمودند و نتیجه گرفتند که مدل TFM نتیجه بهتری دارد. جینزو و همکاران (۱۹۸۸) آزمایش انتقال املاح را در مزرعه و با استفاده از برامید انجام دادند، آنها طی مدت ۱۵۹ روز در هفت مرحله زمانی از کرتها به وسیله مته نمونه برداری کردند، پس از پایان آزمایش در یک کرت دیگر ۶۳ آزمایش نفوذپذیری با استفاده از استوانه های منفرد انجام دادند و پس از برازش معادله نفوذ کوستیاکف و تعیین پارامترهای منحنی رطوبتی خاک در عمقهای ۳۰ و ۴۵ سانتیمتر (با برازش بر معادله وان گن اوختن) سعی کردند با استفاده از نتایج آزمایش نفوذپذیری حرکت املاح در خاک را به صورت مستقل و بدون واسنجی مدل برآورد نمایند و نتیجه خوبی نیز به دست آوردند. توربورن و رز (۱۹۹۰) با استفاده از بیلان رطوبت و املاح مدل ساده ای برای تشخیص میزان جریان از منافذ درشت محیط متخلخل را پیشنهاد نمودند و در آزمایش عملی نتیجه گرفتند که حداکثر جریان سه برابر جریان متوسط گذشته از توده متخلخل خاک می باشد، آنها رابطه ساده ای بین جریان در منافذ درشت و خصوصیات خاک به دست آوردند. کوستا و همکاران (۱۹۹۴) چهار مدل انتقال املاح را با استفاده از اطلاعات دیگر محققین که مستقلاً به دست آمده بود مقایسه نمودند.

شعبانپور و همکاران (۱۳۷۹) انتقال برامید را در شرایط مزرعه بررسی کردند و نتیجه گرفتند که کشت گیاهان در یک سال نمی تواند تأثیر قابل ملاحظه ای بر حرکت برامید در خاک داشته باشد. هدف از این تحقیق مقایسه کارایی سه مدل

آبشویی مواد شیمیایی از خاک و انتقال آنها به آبهای زیر زمینی باعث آلودگی منابع آبی میشود. همچنین آبشویی کودها و انتقال آنها به خارج از منطقه ریشه باعث کاهش بازده کودها خواهد شد. بنابراین برآورد مقدار کمی انتقال و انبارش املاح در خاک در بسیاری موارد مهم است. متأسفانه برآورد کمی انتقال املاح در مزرعه به دلیل نیاز به اندازه گیریهای زیاد غلظت در عمقها و زمانهای مختلف مشکل، وقت گیر و پرهزینه است و استفاده از مدلهای انتقال املاح کمک مهمی در این برآورد خواهد نمود. در این رابطه تحقیقات زیادی روی حرکت املاح در خاک انجام گرفته است (۱۶، ۱۰، ۸، ۴ و ۱۷). نقطه مشترک در تحقیقات مزرعه ای وجود تغییرات مکانی بسیار زیاد در حرکت املاح مخصوصاً در حالتها غیر اشیاع می باشد. این تغییرات مکانی حتی هنگامی که سعی بسیار برای اضافه کردن یکنواخت مواد شیمیایی به کار می رود دیده می شود (۱۰، ۴ و ۱۵). بیگر و نلسون (۱۹۷۶) از مدل CDE برای برآورد حرکت کلرید و نترات از یک مزرعه ۱۵۰ هکتاری استفاده کردند و با استفاده از برازش مدل بر مقادیر مشاهده شده سرعت حرکت آب در منافذ<sup>۱</sup> (V) ضریب انتشار<sup>۲</sup> (D) را برای هر محل نمونه برداری به دست آوردند و با استفاده از آمار نشان دادند که لگاریتم این شاخصها دارای توزیع نرمال می باشد. جوری (۱۹۸۲) از مدل TFM برای برآورد انتقال املاح استفاده کرد. این مدل که بر اساس فرضیه احتمالات بنا شده است در

<sup>۱</sup> Pore flow Velocity

<sup>۲</sup> Dispersion Coefficient

متفاوت در برآورد حرکت برماید در شرایط  
مزرعه است.

سه تیمار گندم، ذرت و یونجه و یک تیمار شاهد و در سه تکرار در کرت‌های ده متر مربعی انجام گرفت. فاصله بین تیمارها ۵۰ سانتیمتر و فاصله بین تکرارها ۱۰۰ سانتیمتر بود و اطراف کرت‌ها پشته‌هایی به ارتفاع ۱۵ و عرض ۵۰ سانتیمتر ایجاد شد. به منظور تعیین رطوبت خاک با دستگاه نوترون متر در مرکز هر کرت یک لوله آلومینیوم به قطر داخلی ۴/۲ و طول ۱۵۰ سانتیمتر نصب گردید. لوله‌ها حدود ۱۰ سانتیمتر از سطح خاک بیرون قرار داده شدند. گندم پاییزه رقم مهدوی، ذرت رقم ۷۰۴ و یونجه همدانی که کاشت آنها در منطقه متداول است برای کشت انتخاب شدند. در سال اول کاشت گندم در آبان ۱۳۷۶، کاشت یونجه و ذرت در خرداد ۱۳۷۷، برداشت گندم در تیرماه ۱۳۷۷ و برداشت ذرت در آبان ۱۳۷۷ انجام شد. در سال دوم کاشت گندم در آبان ۱۳۷۷، کاشت ذرت در اردیبهشت ۱۳۷۸، برداشت گندم در خرداد ۱۳۷۸ و برداشت ذرت در مهرماه ۱۳۷۸ انجام شد. یونجه‌ها در فصل رشد تقریباً هر دو ماه یک بار یک چین برداشت شدند. آبیاری، کوددهی و دیگر عملیات داشت طبق روال معمول منطقه انجام شد. در کرت‌های شاهد فقط عملیات شخم، دیسک، کوددهی، آبیاری و دفع علف‌های هرز انجام شد. نتایج آزمایش‌های اولیه خاک در جدول ۱ نشان داده شده است.

## مواد و روشها

این تحقیق در ایستگاه تحقیقاتی خاک و آب کرج (واقع در مشکین دشت) انجام گرفت. ارتفاع ایستگاه از سطح دریا ۱۳۱۲/۵ متر و دارای آب و هوای معتدل متمایل به سرد و متوسط بارندگی سالانه آن ۲۳۷/۵ میلیمتر میباشد. خاک منطقه از آبرفت‌های بادبزی شکل رودخانه کرج تشکیل شده، خاکی است عمیق با شیب کلی صفر تا دو درصد و از نظر طبقه بندی در فامیل Fine Loamy, Over Fragmental, Mixed, Thermic, Typic Torriorthent قرار دارد.

قطعه انتخاب شده در شمال ایستگاه واقع است و خاک آن از سری فرخ آباد با عمق بیش از ۱۲۰ سانتیمتر می باشد. بافت خاک تا عمق ۵۰ سانتیمتری لوم رسی و در عمق‌های بیشتر رس سیلتی است. متوسط جرم مخصوص ظاهری خاک ۱/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب است. آزمایش به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با

جدول ۱ نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل طرح در مهر ۱۳۷۶.

ردیف	عمق نمونه برداری	EC(dS/m)	PH	درصد شن	درصد	درصد	بافت
۱	۰-۲۵	۱/۷۰	۷/۵	۳۰	۳۹	۳۱	C-L
۲	۲۵-۵۰	۱/۷۰	۷/۵	۲۵	۴۲	۳۳	C-L
۳	۵۰-۷۵	۱/۹۰	۷/۵	۱۵	۴۵	۴۰	Si-C-L
۴	۷۵-۱۰۰	۰/۷۵	۷/۴	۱۴	۴۶	۴۰	Si-C-L
۵	۱۰۰-۱۲۵	۰/۶۰	۷/۴	۱۲	۴۷	۴۱	Si-C
۶	۱۲۵-۱۵۰	۰/۶۰	۷/۴	۱۲	۴۴	۴۴	Si-C

خاک به سادگی امکان پذیر می باشد. برماید پتاسیم به مقدار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار (معادل ۳۰ گرم در متر مربع) برماید خالص (با توجه به درصد

از برماید به عنوان ردیاب استفاده گردید زیرا مقدار زمینه آن در اغلب خاکها کم است، در خاک غیر فعال است و تعیین غلظت آن در

خلوص) در آب حل شد و به وسیله سمپاش موتوری به صورت کاملاً یکنواخت به سطح کرتها اضافه شد و بلافاصله با ۱/۵ سانتیمتر آبیاری بارانی (با استفاده از شیلنگ و سر آبیاش) به داخل خاک نفوذ داده شد. اضافه کردن ردیاب در کرتهای گندم پس از برداشت، در کرتهای یونجه پس از برداشت دومین چین هر سال و در کرتهای ذرت دو ماه پس از کشت انجام گردید. تاریخ اضافه کردن ردیاب در سال اول ۱۳۷۷/۴/۳۰ و در سال دوم ۱۳۷۸/۳/۱۰ بود. آبیاری به صورت غرقابی انجام شد و با استفاده از کنتور حجم آب دقیقاً تعیین گردید. در سال اول آبیاری در ۸ مرحله انجام شد و در هر مرحله ۸/۵ سانتیمتر آب به کرتها اضافه گردید. در سال اول در دوره آبیاری سه نوبت بارندگی رخ داد که مقدار آنها به آبیاری هر مرحله اضافه شد. باقیمانده برمایند به وسیله آبیاری تکمیلی و باران زمستانه از منطقه اندازه گیری خارج گردید. در سال دوم ردیاب مشابه سال اول اضافه گردید و آبیاری در ۹ مرحله انجام شد و در هر مرحله ۱۰ سانتیمتر آب به کرتها اضافه گردید. رطوبت عمقهای مختلف خاک با استفاده از نوترون متر دو بار در هفته تعیین شد. تبخیر واقعی از سطح خاک به روش جکسون و همکاران (۱۹۷۶) تعیین شد. در این روش فرض می شود که تبخیر از سطح خاک در دو روز اول پس از اضافه کردن آب که خاک مرطوب است برابر تبخیر پتانسیل است و پس از آن به دلیل محدودیت رطوبت خاک تبخیر با جذر زمان کاهش می یابد. تبخیر پتانسیل با استفاده از آمار ایستگاه هواشناسی به دست آمد. نمونه برداری دو روز پس از هر مرحله آبیاری که رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه بود انجام گرفت بنابراین در سال اول ۸ مرحله و در سال دوم ۹ مرحله نمونه برداری صورت گرفت. نمونه برداری با استفاده از مته

به قطر ۵ سانتیمتر از عمقهای ۳۰-۶۰-۹۰-۱۲۰-۱۵۰ سانتیمتری انجام شد و احتیاطهای لازم جهت جلوگیری از اختلاط نمونه های عمقهای مختلف به عمل آمد. پس از هر نمونه برداری سوراخ حاصل با خاک همجوار پر شد و حداقل فاصله ۵۰ سانتیمتر بین محل های نمونه برداری رعایت گردید. بیلان آبی کرتها با معلوم بودن آب ورودی، تغییر میزان رطوبت خاک و تبخیر محاسبه و مقدار آب خالص اضافه شده به هر کرت (NWA) به صورت زیر تعیین شد:

$$NWA = I + P - E - dS \quad (1)$$

در این معادله I ارتفاع آب اضافه شده، P ارتفاع بارندگی، E ارتفاع تبخیر و dS تغییرات رطوبت خاک (همگی بر حسب سانتیمتر) می باشد. چون همه نمونه برداریها در حد ظرفیت مزرعه انجام شد از dS می توان صرف نظر کرد. اندازه گیریهای رطوبت به وسیله نوترون متر نیز این فرض را تأیید می کند. بنابراین آب خالص اضافه شده به سطح خاک برابر نفوذ عمیق (DP) است و بنابراین:

$$DP = NWA = I + P - E \quad (2)$$

مقادیر آب خالص اضافه شده و مقدار تجمعی آن در هر مرحله آبیاری در جدول ۲ نشان داده شده است. نمونه های خاک پس از خشک کردن و کوبیدن از الک ۲ میلیمتر عبور داده شد. سپس به ۱۰ گرم خاک خشک هر نمونه ۵۰ میلی لیتر آب مقطر و ۲ میلی لیتر نیترات پتاسیم ۲/۵ مولار برای تثبیت قدرت یونی اضافه شد. سوسپانسیون حاصل به مدت ۰/۵ ساعت تکان داده شد و پس از یک روز غلظت برمایند در محلول صاف رویی با استفاده از الکتروود انتخابگر برمایند اندازه گیری شد (۱) از برنامه کامپیوتری CXTFIT و سه مدل جریان روان-انتشار، انتقال ناحیه ای و تابع انتقال برای برازش بر اطلاعات مشاهده شده استفاده شد (۱۴). در مدل جریان روان-انتشار فرآیند انتقال در اثر دو

بدین معنی است که خاک را به صورت تعداد زیادی ستونهای مستقل جریان فرض کنیم. فرض می شود که انتقال در هر ستون بر اساس معادله CDE با سرعت (V) و ضریب انتشار (D) معین انجام می گیرد و بین ستونهای مختلف هیچ جریانی وجود ندارد. برای سرعت جریان در ستونهای مختلف توزیع لوگ نرمال در نظر گرفته می شود،

پدیده جریان روان (جریان توده ای) و انتشار در نظر گرفته می شود و دو عامل V (سرعت جریان در منافذ) و D (ضریب انتشار) بیانگر خصوصیات انتقال محیط خاک می باشند. مدل انتقال ناحیه ای شبیه مدل CDE است با این تفاوت که فرض می شود که سرعت جریان در نقاط مختلف مزرعه ثابت نیست. این فرض

جدول ۲- مقادیر آب خالص اضافه شده و آب خالص تجمعی در هر مرحله آبیروی.

-	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	نوبتهای آبیروی در سال اول
-	۵/۰۷	۶/۷۴	۵/۰۷	۵/۳۹	۵/۳۹	۶/۹۳	۶/۷۱	۸/۶۰	آب خالص اضافه شده (cm)
-	۴۹/۹۰	۴۴/۸۳	۳۸/۰۹	۳۳/۰۲	۲۷/۶۳	۲۲/۲۴	۱۵/۳۱	۸/۶۰	آب خالص تجمعی (cm)

۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	نوبتهای آبیروی در سال دوم
۵/۸۸	۵/۲۶	۵/۹۴	۶/۸۵	۵/۷۰	۵/۸۷	۶/۷۵	۷/۱۲	۶/۰۶	آب خالص اضافه شده (cm)
۵۵/۲۳	۴۹/۵۵	۴۴/۲۹	۳۸/۳۵	۳۱/۵۰	۲۵/۸۰	۱۹/۹۳	۱۳/۱۸	۶/۰۶	آب خالص تجمعی (cm)

(۱۹۷۷) نشان داد که اگر به جای زمان از مقدار نفوذ عمقی استفاده شود می توان در جریان غیر ماندگار نیز از یک مدل جریان ماندگار استفاده کرد. بنابراین ابتدا جریان آب در خاک را ماندگار فرض نموده و شدت متوسط آبیروی (q) به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$(5) \quad (D \text{ دوره آبیروی}) / (\text{ارتفاع تجمعی کل آبیروی}) = q$$

سانتیمتر در روز  $q = (49.90) / (78) = 0.64$  سال اول  
 سانتیمتر در روز  $q = (55.6) / (42) = 1.32$  سال دوم  
 در مدل به جای شدت آبیروی از سرعت آب در منافذ (v) استفاده می شود و  $v = q/M$  که M رطوبت متوسط در دوره آبیروی است، چون تمام مراحل آبیروی در رطوبت حد ظرفیت مزرعه انجام شد و بافت خاک در عمقهای مختلف تغییر کمی دارد به منظور سادگی محاسبات رطوبت متوسط ۳٪ فرض شد. سایر پارامترهای ورودی مدل شامل ضریب دیرآیی<sup>۶</sup> (برای آنیون برماید برابر یک است)، انتشارپذیری خاک (مقدار اولیه برای آن یک

اساس فرضیه این است که بسیاری از محققین نشان دادند که توزیع سرعت جریان در مزرعه لوگ نرمال است (۴).

$$V = \exp(u + 0.5os^2) \quad (3)$$

در این معادله s، u به ترتیب میانگین و انحراف معیار  $\ln(v)$  هستند که برای هر خاک مقادیر آنها با برازش مدل قابل محاسبه است و v میانگین سرعت در مزرعه می باشد. در مدل RSM برای سادگی محاسبات مقدار ضریب انتشار در هر ستون وابسته به سرعت جریان فرض و به صورت زیر توصیف می گردد.

$$D = eV \quad (4)$$

در این معادله e انتشارپذیری<sup>۳</sup> است که برای هر خاک قابل محاسبه است. مدل تابع انتقال نیز شبیه مدل RSM است با این تفاوت که از تأثیر انتشار صرف نظر می شود. این مدلها برای جریان آبیروی ماندگار<sup>۴</sup> طراحی شده اند در حالی که آبیروی به صورت غیر ماندگار<sup>۵</sup> صورت گرفته است. ویرنگا

<sup>۳</sup> Dispersivity

<sup>۴</sup> Steady State

<sup>۵</sup> Transient

<sup>۶</sup> Retardation Factor

سانتیمتر فرض می شود) می باشد. پس از برازش مقادیر بهینه شده پارامترهای  $e, D, V$  برای هر تیمار به دست می آید. برای برازش مدل بر اطلاعات و تعیین پارامترهای بهینه و ضریب تبیین<sup>۷</sup> ( $r^2$ ) از روش آماری حداقل مربعات استفاده شده است.

## نتایج

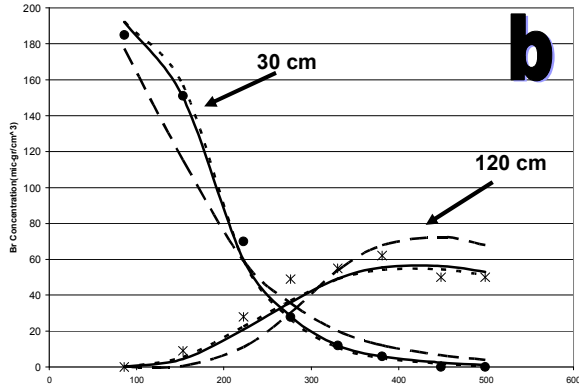
غلظتهای اندازه گیری شده و مقادیر برازش شده به وسیله سه مدل در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. چون توزیع غلظتها در مزرعه لوگ نرمال است (۶) از میانگین هندسی غلظت در سه تکرار استفاده شده است. به منظور کاهش تعداد شکل‌ها نتایج بعضی عمقها نشان داده نشده است، اما در مدلسازی و تفسیر مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل مشاهده می شود که تغییرات غلظت نسبت به NWA روند مشخصی دارد. البته انحرافات نیز مشاهده می شود که ناشی از غیر همگنی خاک و تغییرات مکانی زیاد پارامترهای انتقال ( $e, V$ ) در خاک می باشد، این غیر همگنی قبلاً نیز به وسیله بیگر و نلسون (۱۹۷۶)، ریس و همکاران (۱۹۸۵) و جینز و همکاران (۱۹۸۸) گزارش شده است. برازش مدل بر اطلاعات هر تیمار به صورت همزمان در چهار عمق نمونه برداری انجام گرفته است تا یک مقدار واحد برای پارامترها در هر تیمار به دست آید. این کار در صورتی ممکن است که نیمرخ خاک از نظر عمقی همگن فرض شود که در شرایط آزمایش فرضی منطقی می باشد، اما به هر حال باعث ایجاد انحرافات در برآورد می شود. در صورتی که تعداد نمونه برداریها بیشتر بود برازش مدل در هر عمق می توانست جداگانه صورت گیرد و بدیهی است

که نتیجه بهتری به دست می آید (این کار منجر به محاسبه چهار مقدار برای پارامترها در هر تیمار می گردید). ضریب تبیین بحرانی در سطح یک درصد با استفاده از جداول آماری در سالهای اول و دوم به ترتیب ۰/۴۴۹ و ۰/۴۱۸ است و با توجه به جدول ۳ مشاهده می شود که ضریب تبیین به دست آمده در تمام حالتها بزرگتر از ضریب تبیین بحرانی است در نتیجه برازش مدل بر اطلاعات در سطح یک درصد معنی دار و قابل قبول میباشد.

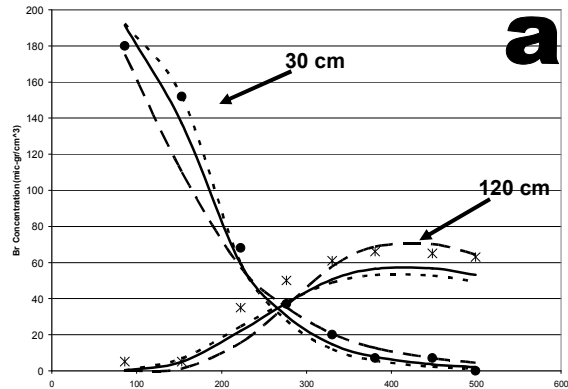
$*V(\text{cm/day}), D(\text{cm}^2/\text{day}) \text{ and } e(\text{cm})$

مدل RSM بهترین برآورد را بین مدلها نشان می دهد. این نتیجه نشانگر این است که فرض توزیع لوگ نرمال برای سرعت جریان فرض صحیحی بوده است (۴). مدل TFM نیز نتیجه بسیار خوبی نشان می دهد و تقریباً مشابه مدل RSM است. چون در مدل TFM از تأثیر انتشار صرف نظر شده است نتیجه می گیریم که تأثیر انتشار بر انتقال برآید در مقایسه با سرعت جریان کوچک و قابل اغماض است که تأییدی است بر نتایج به دست آمده به وسیله آموزگار فرد و همکاران (۱۹۸۳) و جینز و همکاران (۱۹۸۸). مدل CDE نیز نتیجه قابل قبولی نشان می دهد اما ضریب تبیین آن از دو مدل دیگر کوچکتر است. این نتیجه با نتایج به دست آمده به وسیله جوری و اسپوزیتو (۱۹۸۵) هماهنگی دارد. با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده می شود که تغییر معنی داری در سرعت جریان و انتشار پذیری در تیمارهای سال اول مشاهده نمی شود اما در تیمارهای ذرت، گندم و یونجه در سال دوم سرعت جریان نسبت به شاهد به ترتیب ۵۴،۸۶ و ۱۲۱ درصد و انتشارپذیری در تیمارهای یونجه و ذرت در سال دوم نسبت به شاهد به ترتیب ۳۳۰ و ۴۳۰ درصد افزایش یافته است. افزایش سرعت جریان و

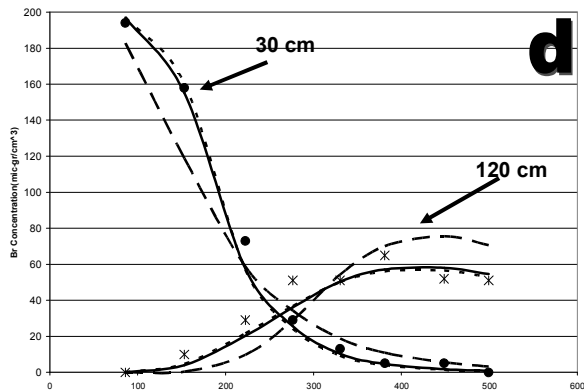
انتشارپذیری می تواند بیانگر افزایش جریانهای  
ترجیحی در خاک باشد (۱۸). این افزایش



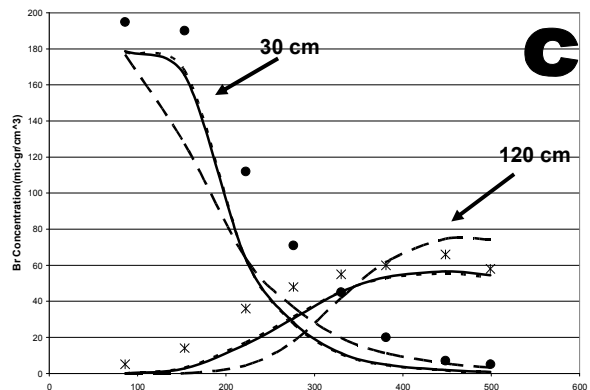
مقدار آب خالص اضافه شده به سطح خاک (NWA) ( میلی متر )



مقدار آب خالص اضافه شده به سطح خاک (NWA) ( میلی متر )

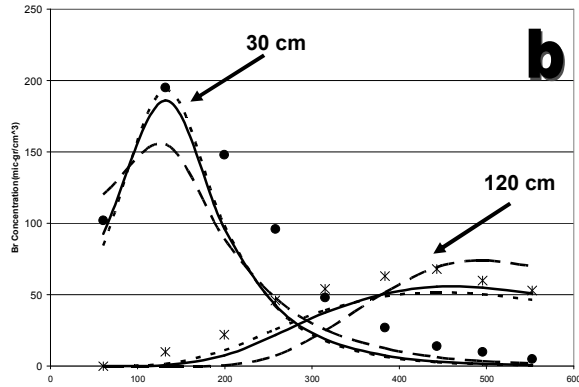


مقدار آب خالص اضافه شده به سطح خاک (NWA) ( میلی متر )

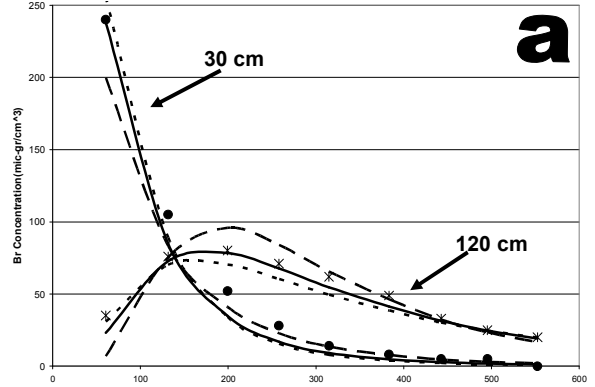


مقدار آب خالص اضافه شده به سطح خاک (NWA) ( میلی متر )

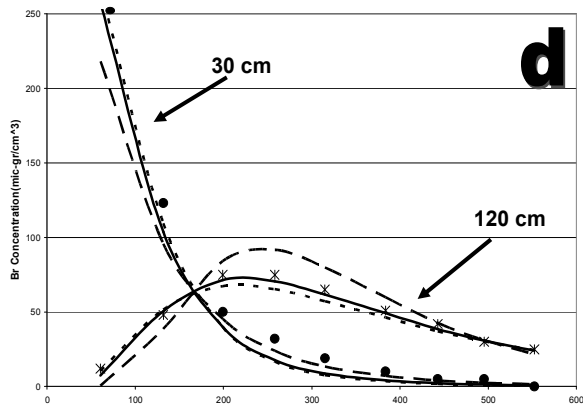
شکل ۱- غلظت‌های اندازه گیری شده ( دایره عمق ۳۰-۰ و ستاره عمق ۱۲۰-۹۰ ) و مقادیر پرازش  
شده بوسیله سه مدل (----)RSM (----)CDE و (....)TFM در سال اول . تیمار یونجه ،  
b شاهد ، c ذرت و d گندم می باشد.



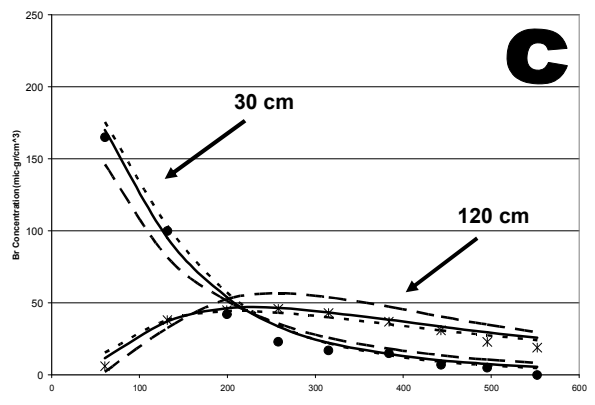
مقدار آب خالص اضافه شده به سطح خاک (NWA) ( میلی متر )



مقدار آب خالص اضافه شده به سطح خاک (NWA) ( میلی متر )



مقدار آب خالص اضافه شده به سطح خاک (NWA) ( میلی متر )



مقدار آب خالص اضافه شده به سطح خاک (NWA) ( میلی متر )

شکل ۲- غلظت‌های اندازه گیری شده ( دایره عمق ۳۰- و ستاره عمق ۹۰-۱۲۰ ) و مقادیر پرازش شده بوسیله سه مدل RSM (----) CDE (----) و TFM (....) در سال اول . a تیمار یونجه ، b شاهد ، c ذرت و d گندم می باشد.



در این زمینه مفصل است و در مقاله جداگانه با بررسی خواهد شد.

می تواند در اثر ریشه های عمیق و پیوسته گیاهان و یا ریشه های پوسیده گیاهان سال قبل باشد. بحث

جدول ۳- مقادیر بهینه شده پارامترها و ضریب تبیین هر مدل پس از برازش بر اطلاعات.

TFM			RSM				CDE			مدلهای مورد آزمایش
$r^2$	S	V	$r^2$	S	$e^*$	V	$r^2$	D*	V*	عوامل مورد بررسی
۰/۹۵۷	۰/۴۷	۱/۶۵	۰/۹۵۷	۰/۴۴	۰/۸۹	۱/۶۳	۰/۹۰۳	۱۲/۴۴	۱/۵۵	شاهد سال اول
۰/۹۵۳	۰/۴۵	۱/۶۶	۰/۹۵۲	۰/۴۳	۰/۶۸	۱/۶۴	۰/۸۹۵	۱۱/۵۱	۱/۵۶	گندم سال اول
۰/۹۳۸	۰/۴۴	۱/۵۸	۰/۹۳۷	۰/۴۳	۰/۴۲	۱/۵۷	۰/۸۵۶	۹/۵۸	۱/۴۸	ذرت سال اول
۰/۹۶۲	۰/۴۸	۱/۶۷	۰/۹۶۰	۰/۴۱	۲/۰۷	۱/۶۴	۰/۹۲۲	۱۴/۱۵	۱/۵۹	یونجه سال اول
۰/۹۵۳	۱/۸۴	۱/۶۴	۰/۹۵۲	۰/۴۳	۱/۰۲	۱/۶۲	۰/۸۹۴	۱۱/۹۲	۱/۵۵	میانگین سال اول
۰/۹۲۶	۰/۴۶	۳/۱۸	۰/۹۲۲	۰/۴۰	۱/۲۶	۳/۱۱	۰/۸۲۹	۱۷/۵۳	۲/۹	شاهد سال دوم
۰/۹۹۱	۰/۶۶	۵/۹۵	۰/۹۹۲	۰/۵۸	۲/۹۳	۵/۷۹	۰/۹۵۱	۷۹/۲۲	۵/۲۳	گندم سال دوم
۰/۹۶۶	۰/۸۷	۵/۱۲	۰/۹۷۸	۰/۷۴	۶/۷۳	۴/۷۸	۰/۹۴۹	۱۲۹/۸۷	۴/۰۸	ذرت سال دوم
۰/۹۸۲	۰/۷۶	۷/۳۳	۰/۹۸۸	۰/۶۲	۵/۵۲	۶/۹	۰/۹۵۱	۱۳۰/۴۳	۶/۱۱	یونجه سال دوم
۰/۹۶۶	۰/۶۹	۵/۴۰	۰/۹۷۰	۰/۵۹	۴/۱۱	۵/۱۵	۰/۹۲۰	۸۹/۲۶	۴/۵۸	میانگین سال دوم
۰/۹۵۹			۰/۹۶۱				۰/۹۰۷			میانگین دو سال

محاسبه نمود. با برنامه ریزی صحیح کود دهی و آبیاری و مصرف بهینه کودها می توان علاوه بر صرفه جویی اقتصادی از آلودگی آبهای زیر زمینی نیز جلوگیری کرد (بخصوص کودهای ازته که مصرف بی رویه آنها باعث ورود نترات به آبهای زیر زمینی می شود). در آبتیوبی خاکهای شور مقدار املاح شسته شده و باقیمانده در خاک در هر مرحله از آبتیوبی به راحتی قابل محاسبه است و می توان روند آبتیوبی را به دقت زیر نظر داشت بدون اینکه نیاز به اندازه گیریهای متوالی غلظت در عمقها و زمانهای مختلف باشد.

حرکت اغلب آنیونها (مثلاً کلرید) شبیه برماید است و می توان بدون هیچ تغییری از مدل استفاده کرد. بعضی آنیونها مثل نترات در خاک در واکنشهای تولید و نابودی<sup>۸</sup> شرکت می کنند و در این موارد لازم است از ترمهای تولید و نابودی که در مدلها پیش بینی شده اند استفاده شود. مقادیر این ضرایب می تواند از منابع مرتبط به دست آید و یا با انجام

عامل دیگری که می تواند برای مقایسه مدلها استفاده شود درصد بازیافت برماید است. درصد بازیافت عبارت است از جرم برماید برآورد شده به وسیله یک مدل در تمام نیمرخ خاک نسبت به جرم برماید اضافه شده به سطح خاک بر حسب درصد. در حالت ایده آل درصد بازیافت باید ۱۰۰ درصد باشد اما در عمل وجود خطاهای غیر قابل کنترل یا فرضهای غیر واقعی باعث انحراف درصد بازیافت می شود. درصد بازیافت محاسبه شده به وسیله مدلهای TFM, RSM, CDE به ترتیب ۱۰۷/۱۰۶، ۶/۸ و ۱۰۷/۵ و درصد است که نشانگر دقت خوب مدلها می باشد. درصد بازیافت محاسبه شده به وسیله مدل CDE نسبت به دو مدل دیگر بهتر است (چون به صد نزدیکتر است) اما اختلاف مقادیر به دست آمده معنی دار نیست.

#### پیشنهادها

با تأیید امکان پذیری کاربرد مدلها می توان از آنها برای برآورد و تجمع املاح مختلف استفاده کرد. مثلاً در مدیریت کودی می توان مقدار کود خارج شده از منطقه ریشه را در هر مرحله از رشد گیاه

یک آزمایش آبشویی و واسنجی مدل مقدار آنها را در شرایط عملی به دست آورد. کاتیونها جذب ذرات خاک می شوند (واکنشهای تبدیلی) و سرعت حرکت آنها نسبت به آنیونها کمتر است. برای برآورد سرعت حرکت کاتیونها می توان از ضریب دیرآیی مناسب استفاده کرد. ضریب

دیرآیی می تواند با استفاده از ایزوترم جذب سطحی در آزمایشگاه و یا با واسنجی مدل در شرایط واقعی تعیین شود. استفاده از مدل ساده تر TFM در کارهای مزرعه ای و استفاده از مدل RSM در کارهای علمی در شرایط مشابه توصیه می شود.

## منابع

- ۱-بایوردی، محمد. (۱۳۷۲). فیزیک خاک. چاپ پنجم. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۶۷۱ ص.
- ۲- شعبانپور شهرستانی، محمود. (۱۳۷۸). انتقال املاح در شرایط مزرعه. رساله دکترای خاکشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۲۳۱ ص.
- ۳- شعبانپور شهرستانی، محمود، سید فرهاد موسوی، مجید افیونی و سعید سعادت (۱۳۷۹). انتقال برماید در شرایط مزرعه. مجله علوم خاک و آب، جلد ۱۴، شماره ۱، صفحه ۹۷-۹۲.
1. Abdalla, N.A., and B.Lear. 1975. Determination of inorganic bromide in soils and plant tissues with bromide selective-ion electrode. *Commun. in Soil. and plant Analysis*. 6:489-494.
2. Agus, F., and D.K. Cassel. 1992. Field-scale bromide transport as affected by tillage. *Soil sci. Am J* . 56:254-260.
3. Amoozegar-Fard, A., Nielsen, D.R. and Warrick, A.W. (1982). Soil solute concentration distribution for spatially varying pore water velocities and apparent diffusion coefficients. *Soli Sci. Soc. Am J* . 46:3-9.
4. Biggar, J.W., and D.R. Nielsen. 1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soils. *Water Resour. Res* 12:78 -84.
5. Bowman, R.S., and R.C. Rice. 1986. Transport of conservative tracer in the field under intermittent flood irrigation. *Water Resour. Res* 22:1531 -1536.
6. Caron, J., O. Benton, D.A. Anger, and J.P. Villeneuve. 1996. Preferential bromide transport through a clay loam under alfalfa and corn. *Geoderma*. 69:175-191
7. Costa, J.L., R.E. Knighton, and L. Prunty. 1994. Model comparison of unsaturated steady-state solute transport in a field plot. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 58:1277-
8. Ellsworth, T.R., W.A. Jury, F.F. Ernst, and P.J. Shouse. 1991. A three-dimensional field unsaturated, layered, porous media. 1: Methodology, mass recovery and mean transport. *Water Resour. Res* 27:951-965.
9. Jackson, R.D., S.B. Idso, and R.J. Regineto. 1976. Calculation of evaporation rates during the transition from energy-limiting to soil-limiting phases using albedo data. *Water Resour. Res*. 12:23-26
10. Jaynes, D.B., R.C. Rice, and R.S. Bowman. 1988. Independent calibration of a mechanistic-stochastic model for field-scale solute transport under flood irrigation. *Soil Sci. Soc. Am J* . 52:1541-1546.
11. Jury, W.A. 1982. Simulation of solute transport using a transfer function model. *Water Resour. Res*. 18:363-368.
12. Jury, W.A., L.H. Stolzy, and P. Shouse. 1982. A field test of transfer function model for prediction of solute transport. *Water Resour. Res* 18:369 -375.
13. Jury, W.A., and G. Sposito. 1985. Field calibration and validation of solute transport models for the unsaturated zone. *Soil Sci. Soc Am J* . 49:1331-1341.

14. Parker, J.C., and M.Th. van Genuchten. 1984. Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments. Virginia Agric. Exp. Bull. 84.
15. Rice, R.C., R.S.Bowman, and D.B.Jaynes. 1985. Percolation of water below an irrigated field. Soil Sci. Soc. Am. 50:855-859.
16. Roth, K., W.A.Jury, H.Fluhler, and W.Attinger. 1991. Transport of chloride through an unsaturated field soil. Water Resour. Res. 27:2533 -2541.
17. Thorburn, P.J., and C.W.Rose. 1990. Interpretation of solute profile dynamics in irrigated soil. 3: A simple model of bypass flow in soils. Irrigation Sci. 11:219-225.
18. Van Ommen, H.C. (1988). Transport from diffuse sources of contamination and its application to a coupled unsaturated- saturated system. Ph.D. diss. Wageningen Agricultural Univ., Wageningen, the Netherlands.
19. Wierenga, P.J. (1977). Solute distribution profiles computed with steady- state and transient water movement models. Soil Sci. Soc. Am. , 41:1050-1055.

# Comparison of Three Solute Transport Models Using Bromide as a Tracer

M. Shabanpoor\*

## Abstract

Simulation of solute transport in soil profile has many applications in agricultural and environmental problem such as management of plant nutrients, transport of pollutants and reclamation of saline soils. The objective of this study was to compare simulated results from three models with measurements of solute transport in a field planted with corn, wheat and alfalfa. Potassium bromide (300 kg/ha) was applied uniformly to the soil surface and then 1.5 cm of water was sprinkled over the plots in first and second year.

Plots were leached 8 times during the first year (each time with 8.5 cm of water) and 9 times in the second year (each time with 10 cm of water). Soil samples were collected from 0-30, 30-60, 60-90 and 90-120 cm depths two days after each application of water. Bromide concentration in soil samples were measured using an ion selective electrode. Moisture content in each plot was also measured using a neutron meter to a depth of 120 cm. Net application of water was based on the calculated evaporation loss from the soil profile.

CXTFIT code and three models of Regional Stochastic model (RSM), Convective -Dispersive Equation (CDE) and Transfer Function Model (TFM) were used to simulate leaching of water application under field conditions. The results showed that after addition of 25 cm of water 30% of bromide were leached out from the top 50 cm of soil in all plots in first year and control plots in second year but in second year 47,67 and 70% of bromide were leached out from the top 50 cm of soil in corn, wheat and alfalfa plots, respectively.

The RSM, TFM and CDE models showed a reasonable estimates for bromide leaching and storage in soils. In TFM model, the effects of dispersivity is not considered. Thus, the close estimation of RSM and TFM shows that the effect of dispersivity as compared with flow velocity on transport of bromide in soils is insignificant. The differences in simulated results were acceptable, since spatial variations in soil characteristics are unavoidable. Using the simpler TFM model in practical situations and RSM model in research projects is recommended.

**Keywords:** Regional Stochastic model, Convective -Dispersive Equation, Transfer Function Model, dispersivity

---

\* Assistant Prof., Soils Dept. Guilan University. Iran.