انتقال برماید در خاک‌های زیر کشت گیاهان مختلف

محمود شعبانپور شهرستانی[۱]، مجید افیونی[۲] و سیدفرهاد موسوی[۳]

چکیده

انتقال برماید (به عنوان ردیاب) در مزرعه زیر سه کشت ذرت، گندم و یونجه، با یک شاهد در سه تکرار و با طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو سال پی در پی بررسی گردید. مقدار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار برماید خالص به صورت برماید پتاسیم در آب حل و به صورت یک‌نواخت همراه با ۱۵ میلی‌متر آبیاری بارانی به سطح کرت‌های آزمایشی افزوده شد. آب‌شویی در سال اول در هشت مرحله، و در هر مرحله با ۸۵ میلی‌متر آب به صورت غرقابی انجام گرفت. در سال دوم ردیاب مانند سال اول به خاک افزوده شد، و آب‌شویی در ۹ مرحله و در هر مرحله با ۱۰۰ میلی‌متر آب انجام گرفت. نمونه‌برداری به وسیله آگر از عمق‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متر، چند روز پس از هر مرحله آب‌شویی انجام شد. غلظت برماید در نمونه‌های خاک به وسیله الکترود انتخاب‌گر اندازه‌گیری شد. تغییرات رطوبت خاک با استفاده از نوترون‌متر اندازه‌گیری، و پس از محاسبه تبخیر واقعی از سطح خاک در هر مرحله آب‌شویی، مقدار آب خالص افزوده شده به کرت‌ها در هر مرحله نمونه‌برداری محاسبه گردید. از برنامه CXTFIT و مدل انتقال منطقه‌ای (RSM) برای مدل‌سازی حرکت برماید استفاده شد.

نتایج نشان داد که تأثیر پراکنش‌پذیری در فرایند حرکت نسبت به سرعت جریان بسیار کمتر است، و غالباً می‌توان از تأثیر آن در حرکت چشم‌پوشی کرد. سرعت جریان در تیمارهای ذرت، گندم و یونجه در سال دوم به ترتیب ۱/۵۴، ۱/۸۶ و ۲/۲۱ برابر تیمارهای شاهد بود. پراکنش‌پذیری نیز در تیمارهای یونجه و ذرت در سال دوم به ترتیب ۴/۳ و ۵/۳ برابر تیمارهای شاهد بود. افزایش سرعت جریان و پراکنش‌پذیری گویای افزایش جریان‌های ترجیحی در تیمارهای زیر کشت در سال دوم است، که می‌تواند در اثر ریشه‌های عمیق و پیوسته گیاهان و تأثیر ریشه‌های پوسیده گیاهان سال اول باشد. برماید آب‌شویی شده از لایه ۵۰ سانتی‌متری خاک، پس از افزودن ۲۵ سانتی‌متر آب خالص در بیشتر تیمارها، در حدود ۳۰ درصد بود. در تیمارهای گندم، ذرت و یونجه در سال دوم، این مقدار به ترتیب ۴۷، ۶۷ و ۷۰ درصد بود، که نشان دهنده حرکت سریع‌تر برماید به عمق خاک در اثر افزایش سرعت جریان و جریان‌های ترجیحی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ***برماید، آب‌شویی، مدل سازی انتقال املاح، پراکنش‌پذیری، ریشه گیاه***

---

۱. استادیار خاک‌شناسی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲. دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. استاد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]

مقدمه

آب‌شویی مواد شیمیایی از زمین‌های کشاورزی و انتقال آنها به آب‌های زیرزمینی باعث آلودگی منابع آب می‌شود. پژوهش‌های زیادی در باره حرکت املاح در خاک، در آزمایشگاه و در مزرعه انجام گرفته است (۵، ۸، ۱۰، ۱۵ و ۱۶). نقطه مشترک در پژوهش‌های مزرعه‌ای وجود تغییرات مکانی (Spatial variations) بسیار زیاد درحرکت املاح، به ویژه در حالت غیر اشباع می‌باشد. این تغییرات مکانی حتی هنگامی که تلاش بسیار برای افزودن یک‌نواخت مواد شیمیایی انجام می‌گردد، دیده می‌شود (۴، ۵، ۱۰ و ۱۴). مهم‌ترین عواملی که بر حرکت املاح در خاک تأثیر می‌گذارند عبارت‌اند از بافت، ساختمان و هدایت موییننگی خاک، که تحت تأثیر مدیریت و عملیات خاک‌ورزی قرار دارند. بررسی‌های زیادی در باره حرکت املاح در شرایط خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی انجام گرفته است (۳).

برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بسته به نوع گیاه و سیستم ریشه‌ای آن، خواص هیدرولیکی خاک تغییر می‌کند. برای مثال، گیاهانی مانند یونجه که دارای ریشه‌های عمیق هستند، کانال‌های عمقی در خاک ایجاد می‌کنند، که باعث حرکت سریع‌تر املاح به عمق خاک می‌شود (جریان ترجیحی یا Preferential flow). مطالعه در باره سیستم ریشه، حرکت املاح و مدل‌سازی در این شرایط بسیار محدود است (۷).

پژوهش‌های انتقال املاح در بسیاری از فرایندهای مهم خاک‌شناسی مانند آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی، آب‌شویی و حرکت عناصر غذایی در خاک مهم می‌باشد، و توصیف این فرایندها و هر گونه بحث کمّی در باره آنها مستلزم مدل‌سازی انتقال املاح در خاک است.

بیگار و نیلسن (۵) از مدل CDE برای برآورد حرکت کلراید و نیترات در یک مزرعه ۱۵۰ هکتاری بهره بردند، و با استفاده از برازش مدل بر مقادیر مشاهده شده، سرعت حرکت آب در منافذ (V) و ضریب پراکنش (D) را برای هر محل نمونه‌برداری به دست آوردند، و با استفاده از قوانین احتمالات نشان دادند که لگاریتم این شاخص‌ها توزیع نرمال دارد.

جوری (۱۱) از مدل TFM (Transfer Function Model) برای برآورد انتقال املاح استفاده کرد. این مدل که بر اساس فرضیه احتمالات بنا شده است، در آزمایش‌های مزرعه‌ای برآورد خوبی از جا به جایی املاح داشت (۱۲). آگوس و کسل (۳) اثر خاک‌ورزی را بر حرکت املاح در مزرعه بررسی کردند. آنان به این منظور از سه تیمار خاک‌ورزی استفاده کردند، و نتیجه گرفتند که عملیات خاک‌ورزی باعث افزایش سرعت برماید نسبت به شاهد می‌شود.

کارن و همکاران (۷) جریان ترجیحی برماید را در خاک تحت سه کشت مختلف بررسی کردند، و نتیجه گرفتند که کشت مداوم یونجه در چهار سال می‌تواند باعث ایجاد جریان‌های ترجیحی بیشتری نسبت به کشت ذرت گردد. در پایان آزمایش، هدایت هیدرولیکی در عمق ۵۰ سانتی‌متر در کشت یونجه بیشتر از کشت ذرت بود. این پژوهش‌گران نیز از مدل TFM برای برآورد انتقال املاح استفاده کردند و نتیجه خوبی به دست آوردند.

توربون و رز (۱۶) با استفاده از بیلان رطوبت و املاح، مدل ساده‌ای برای تشخیص آهنگ (Rate) جریان از منافذ درشت پیشنهاد کردند، و در آزمایش عملی نتیجه گرفتند که حداکثر جریان در این منافذ سه برابر جریان متوسط عبور کرده از ماتریس خاک می‌باشد. آنان رابطه ساده‌ای بین جریان در منافذ درشت و ویژگی‌های فیزیکی خاک به دست آوردند. بومن و رایس (۶) نشان دادند که حتی در شرایط غیر اشباع بخش قابل توجهی از آب در مسیرهای جریان ترجیحی حرکت می‌کند.

رایس و همکاران (۱۴) نشان دادند که نفوذ عمقی اندازه‌گیری شده با استفاده از ردیاب‌ها پنج برابر مقدار محاسبه شده از بیلان رطوبتی است، که نشانه آشکاری از مسیرهای جریان ترجیحی با سرعت زیاد در خاک است. بسیاری از پژوهش‌ها امکان‌پذیری کاربرد مدل RSM (انتقال منطقه‌ای یا Regional Stochastic Model) را در انتقال املاح در شرایط مزرعه نشان داده است (۱). با توجه به موارد

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]

یاد شده، مدل‌های انتقال املاح می‌توانند حرکت املاح در خاک را به خوبی برآورد کنند. هدف این پژوهش بررسی نحوه حرکت و انباشته شدن برماید در خاک تحت کشت گندم، ذرت و یونجه در دو سال متوالی، و برازش انتقال برماید در خاک با استفاده از مدل RSM است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی نحوه حرکت برماید در خاک تحت کشت‌های مختلف پس از اعمال تیمارهای کشت و کار، برماید به مقدار مشخص به سطح کرت‌ها افزوده شد. سپس غلظت برماید در مراحل مختلف آب‌شویی و در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری شد. این پژوهش در ایستگاه پژوهشی خاک و آب کرج (واقع در مشکین دشت) انجام گرفت. ارتفاع ایستگاه از سطح دریا ۱۳۱۲ متر، و دارای آب و هوای معتدل متمایل به سرد با میانگین بارندگی سالیانه ۲۳۷ میلی‌متر است. خاک منطقه از آبرفت‌های بادبزنی شکل رودخانه کرج تشکیل شده، و خاکی است عمیق با شیب کلی صفر تا دو درصد، که از نظر طبقه‌بندی 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 فرخ‌آباد با عمق بیش از ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. بافت خاک تا عمق ۵۰ سانتی‌متری لوم رسی، و در عمق‌های بیشتر رس سیلتی است. میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. اراضی انتخاب شده حداقل در پنج سال قبل از آزمایش زیر هیچ کشتی نبوده و عملیات خاک‌ورزی در آنها صورت نگرفته است.

آزمایش به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار گندم، ذرت و یونجه و یک شاهد و در سه تکرار در کرت‌های ده متر مربعی انجام گرفت. فاصله بین تیمارها ۰/۵ متر و فاصله بین تکرارها یک متر بود، و اطراف کرت‌ها پشته‌هایی به ارتفاع ۱۵ و عرض ۵۰ سانتی‌متر ایجاد شد. به منظور تعیین رطوبت خاک با دستگاه نوترون‌متر، در مرکز هر کرت یک لوله آلومینیمی به قطر داخلی ٤۲ میلی‌متر و طول ۱۵۰ سانتی‌متر نصب گردید. لوله‌ها حدود ۱۰ سانتی‌متر از سطح خاک بیرون قرار داده شدند.

گندم پاییزه رقم مهدوی، ذرت رقم ۷۰٤ و یونجه همدانی، که کاشت آنها در منطقه متداول است، برای کشت انتخاب شد. در سال اول، کاشت گندم در آبان ۱۳۷٦، 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.

از یونجه‌ها در فصل رشد تقریباً هر دو ماه یک بار یک چین برداشت شد. آبیاری تا قبل از شروع آب‌شویی هر پنج روز یک بار و به صورت کرتی انجام گرفت. وجین علف‌های هرز به صورت دستی و هر ماه یک بار انجام شد. در کرت‌های شاهد فقط عملیات خاک‌ورزی، کوددهی، آبیاری و دفع علف‌های هرز انجام شد. نتایج آزمایش‌های اولیه خاک در جدول ۱ نشان داده شده است.

از برماید به عنوان ردیاب استفاده گردید، زیرا زمینه آن در اغلب خاک‌ها کم است، در خاک غیر فعال است و تعیین غلظت آن در خاک به سادگی امکان‌پذیر می‌باشد. برماید پتاسیم به مقدار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار (برابر ۳۰ گرم در متر مربع) برماید خالص (با توجه به درصد خلوص) در آب حل شد و به وسیله سم‌پاش موتوری به صورت کاملاً یکنواخت به سطح کرت‌ها افزوده، و بلافاصله با ۱۵ میلی‌متر آبیاری بارانی (با استفاده از شیلنگ و سرآبپاش) به داخل خاک نفوذ داده شد.

افزودن ردیاب در کرت‌های گندم پس از برداشت، در کرت‌های یونجه پس از برداشت چین، و در کرت‌های ذرت دو ماه پس از کشت انجام گردید. تاریخ افزودن ردیاب در سال اول ۱۳۷۷/٤/۳۰ و در سال دوم ۱۳۷۸/۳/۱۰ بود. آب‌شویی به صورت غرقابی انجام شد، و با استفاده از کنتور، حجم آب دقیقاً تعیین گردید.

در سال اول، آب‌شویی در هشت مرحله انجام شد، و در هر

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]

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

عمق (cm)	EC (dS/m)	pH	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	بافت خاک
۰-۲۵	۱/۷	۷/۵	۳۰	۳۹	۳۱	C-L
۲۵-۵۰	۱/۷	۷/۵	۲۵	٤۲	۳۳	C-L
۵۰-۷۵	۰/۹	۷/۵	۱۵	٤۵	٤۰	Si- C-L
۷۵-۱۰۰	۰/۷۵	۷/٤	۱٤	٤٦	٤۰	Si- C-L
۱۰۰-۱۲۵	۰/٦	۷/٤	۱۲	٤۷	٤۱	Si-C
۱۲۵-۱۵۰	۰/٦	۷/٤	۱۲	٤٤	٤٤	Si-C

مرحله ۸/۵ سانتی‌متر آب به کرت‌ها اضافه گردید. در سال اول، در دوره آب‌شویی سه نوبت بارندگی رخ داد که مقدار آنها به آب‌شویی هر مرحله اضافه شد. باقی‌مانده برماید به وسیله آب‌شویی تکمیلی و باران زمستانه از منطقه اندازه‌گیری خارج گردید. در سال دوم، ردیاب مانند سال اول افزوده، آب‌شویی در ۹ مرحله انجام شد، و در هر مرحله ۱۰ سانتی‌متر آب به کرت‌ها اضافه گردید.

رطوبت خاک با استفاده از نوترون‌متر، در عمق‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متری دو بار در هفته اندازه گرفته شد. تبخیر واقعی از سطح خاک به روش جکسون و همکاران (۹) تعیین شد. در این روش فرض می‌شود که تبخیر از سطح خاک در دو روز اول پس از افزودن آب، که خاک مرطوب است، برابر تبخیر پتانسیل است، و پس از آن به دلیل محدودیت رطوبت خاک، تبخیر با جذر زمان کاهش می‌یابد. تبخیر پتانسیل با استفاده از معادله پنمن- مانتیس و آمار ایستگاه هواشناسی به دست آمد.

نمونه‌برداری برای تعیین آب‌شویی Br، دو تا سه روز پس از هر مرحله آب‌شویی، که رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی بود، انجام گرفت. بنابراین، در سال اول هشت مرحله و در سال دوم ۹ مرحله نمونه‌برداری صورت گرفت. نمونه‌برداری با استفاده از آگر به قطر پنج سانتی‌متر از عمق‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متری انجام شد و احتیاط‌های لازم برای جلوگیری از درآمیختن نمونه‌های عمق‌های مختلف به عمل آمد. پس از هر نمونه‌برداری سوراخ حاصل با خاک پر شد، و حداقل فاصله ۵۰ سانتی‌متر بین محل‌های نمونه‌برداری رعایت گردید.

بیلان آبی کرت‌ها با معلوم بودن آب ورودی، تغییرات رطوبت خاک و میزان تبخیر محاسبه، و مقدار آب خالص افزوده شده به هر کرت (NWA) در زمان نمونه‌برداری تعیین شد:

$$NWA=I+P-E-dC \quad [۱]$$

در این معادله، I ارتفاع آب افزوده شده، P ارتفاع بارندگی، E ارتفاع تبخیر و dC تغییرات رطوبت خاک (همگی بر حسب سانتی‌متر) است. چون نمونه‌برداری‌ها در ظرفیت زراعی انجام شد از dC می‌توان چشم‌پوشی کرد. اندازه‌گیری‌های رطوبت به وسیله نوترون‌متر نیز این فرض را تأیید می‌کند. بنابراین، آب خالص افزوده شده به سطح خاک برابر نفوذ عمقی (Deep percolation یا DP) است و:

$$DP= NWA=I+P-E \quad [۲]$$

مقادیر نفوذ عمقی و مقدار تجمعی آن در هر مرحله آب‌شویی در جدول ۲ نشان داده شده است.

نمونه‌های خاک پس از خشک کردن و کوبیدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. سپس به ۱۰ گرم خاک خشک هر نمونه ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر و دو میلی‌لیتر نیترات پتاسیم ۲/۵ مولار برای تثبیت قدرت یونی افزوده شد. سوسپانسیون حاصل به مدت ۰/۵ ساعت تکان داده شد، و پس از یک روز غلظت برماید در محلول صاف شده با استفاده از الکترود انتخاب‌گر برماید اندازه‌گیری گردید (۲).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]

جدول ۲. مقادیر نفوذ عمقی و مقدار تجمعی آن در مراحل مختلف آب‌شویی

مراحل آب‌شویی در سال اول	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
نفوذ عمقی (mm)	۸٦	٦۷/۱	٦۹/۳	٥۳/۹	٥۳/۹	٥۰/۷	٦۷/٤	٥۰/۷
نفوذ عمقی تجمعی (mm)	۸٦	۱٥۳/۱	۲۲۲/٤	۲۷٦/۳	۳۳۰/۲	۳۸۰/۹	٤٤۸/۳	٤۹۹

مراحل آب‌شویی در سال دوم	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹
نفوذ عمقی (mm)	٦۰/٦	۷۱/۲	٦۷/٥	٥۸/۷	٥۷	٦۸/٥	٥۹/٤	٥۲/٦	٥۸/۸
نفوذ عمقی تجمعی (mm)	٦۰/٦	۱۳۱/۸	۱۹۹/۳	۲٥۸	۳۱٥	۳۸۳/٥	٤٤۲/۹	٤۹٥/٥	٥٥۲/۳

برای برازش مدل انتقال منطقه‌ای (۱۳) بر داده‌های مشاهده شده از برنامه کامپیوتری CXTFIT استفاده شد. داده‌ها نشان داده است که این مدل برآورد خوبی از انتقال املاح در مزرعه دارد (۱). در این مدل، خاک به صورت تعداد زیادی ستون مستقل جریان فرض می‌شود. انتقال در هر ستون بر اساس معادله CDE با سرعت V و ضریب پراکنش D معین انجام، و فرض می‌شود که بین ستون‌ها هیچ جریانی وجود ندارد. برای سرعت جریان در ستون‌های مختلف توزیع لوگ نرمال فرض می‌شود. اساس این فرض این است که بسیاری از پژوهندگان نشان داده‌اند که توزیع سرعت جریان در مزرعه لوگ نرمال است (۵):

$$V= \exp(\mu+0.5\sigma^2) \qquad [۳]$$

در این معادله، μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار Ln(V) هستند، که برای هر خاک مقادیر آنها با برازش مدل قابل محاسبه است، و V میانگین مزرعه‌ای سرعت می‌باشد. در این مدل، برای سادگی محاسبات، مقدار ضریب پراکنش در هر ستون وابسته به سرعت جریان فرض می‌شود.

$$D= \varepsilon V \qquad [٤]$$

در این معادله، ε پراکنش‌پذیری است که برای هر خاک قابل محاسبه است. این مدل برای جریان آب‌شویی ماندگار (Steady state) طراحی شده، در حالی که آب‌شویی به صورت غیر ماندگار صورت گرفته است. ویرنگا (۱۸) نشان داد که اگر به جای زمان از مقدار نفوذ عمقی استفاده شود، می‌توان در جریان غیر ماندگار نیز از یک مدل جریان ماندگار استفاده کرد. بنابراین، نخست جریان آب در خاک ماندگار فرض می‌شود، و شدت متوسط آب‌شویی (q) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

[۵] دوره آب‌شویی / ارتفاع تجمعی آب‌شویی = q

سانتی‌متر در روز ٦/٤۰ = (۷۸) / (٤۹/۹۰) = q سال اول

سانتی‌متر در روز ۱/۳۲ = (٤۲) / (٥٥/۲۳) = q سال دوم

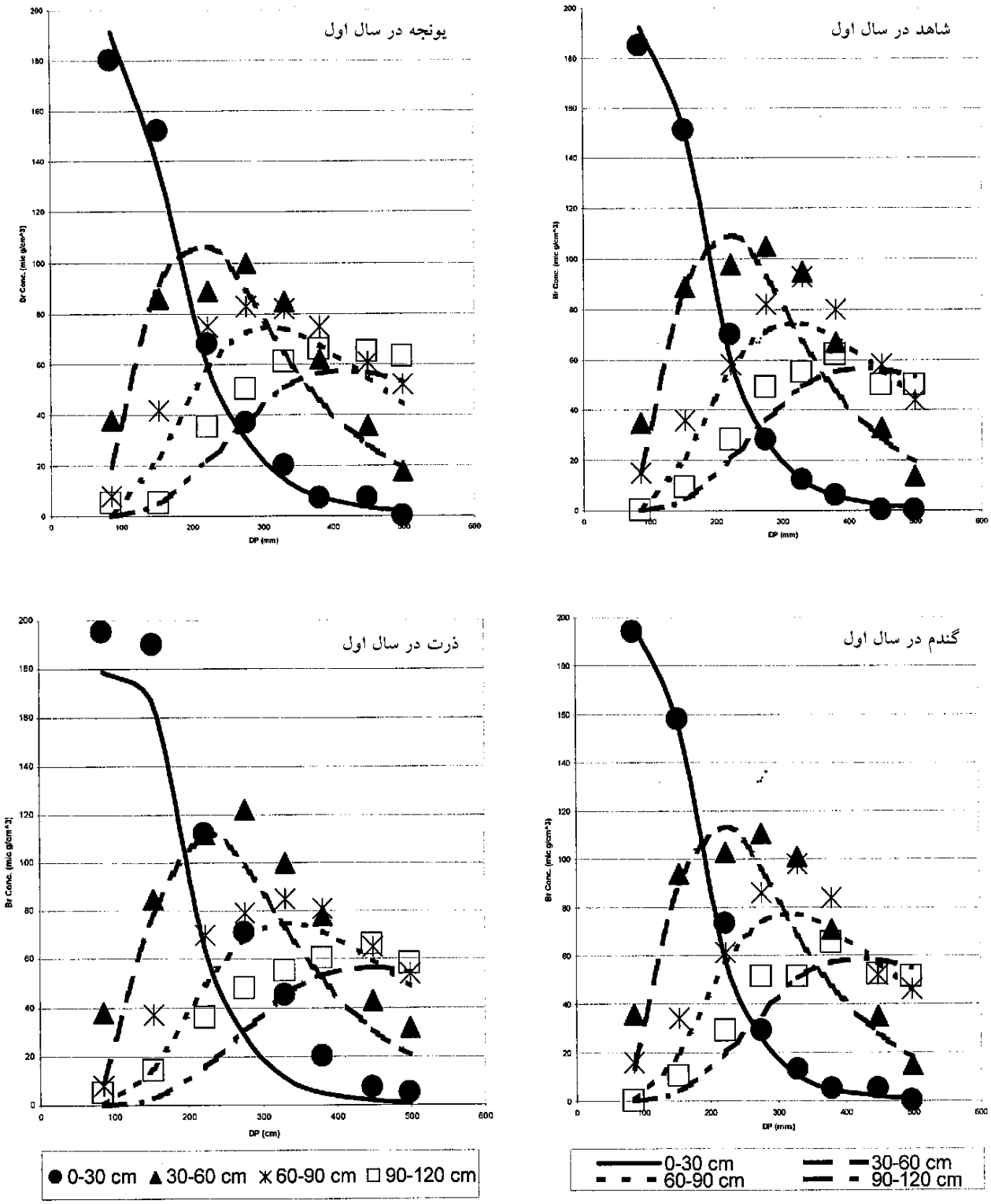
در مدل، به جای شدت آب‌شویی، از سرعت آب در منافذ (V) استفاده می‌شود. V برابر است با q/θ، که θ رطوبت حجمی متوسط در دوره آب‌شویی است، که حدود ۰/۳ بود. عوامل ورودی دیگر مدل شامل ضریب دیرآیی (Retardation factor) (برای آنیون برماید برابر یک است) و پراکنش‌پذیری خاک (مقدار اولیه برابر یک سانتی‌متر فرض می‌شود) است. پس از برازش مقادیر بهینه شده، عوامل V و ε برای هر تیمار به دست می‌آید. برای برازش مدل بر اطلاعات و تعیین عوامل بهینه و ضریب تعیین (R^2)، از روش آماری حداقل مربعات استفاده شده است. برای تعیین معنی‌دار بودن تغییرات سرعت جریان و پراکنش‌پذیری، میانگین‌های تیمارهای مختلف با هم مقایسه شد.

نتایج و بحث

غلظت‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر برازش شده به وسیله مدل RSM در چهار عمق اندازه‌گیری در سال‌های اول و دوم در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. چون توزیع غلظت‌ها در مزرعه لوگ نرمال است (۷)، از میانگین هندسی غلظت در سه

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

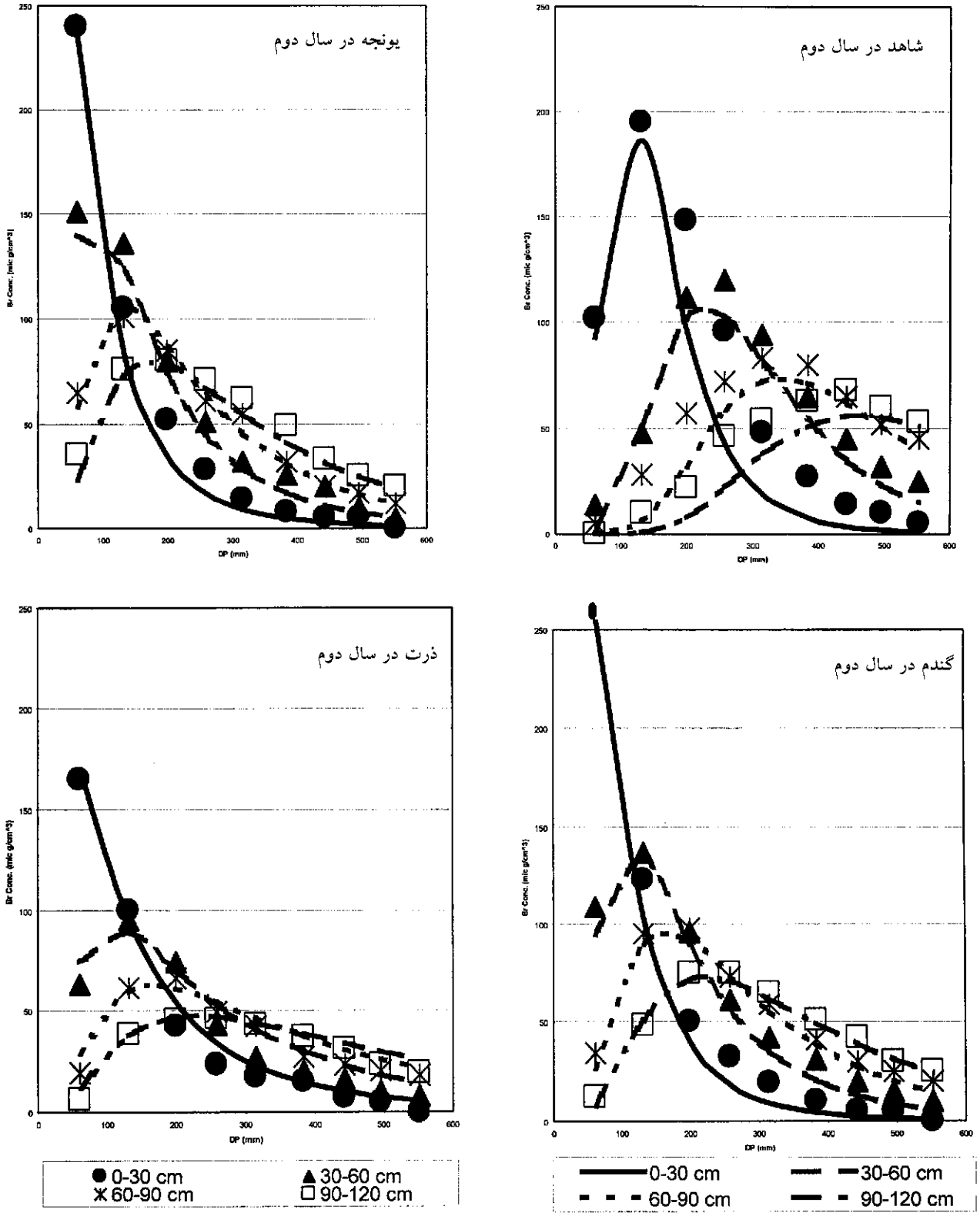
[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]



شکل ۱. غلظت‌های اندازه‌گیری شده (نشانه‌ها) و مقادیر برازش شده (خطوط) به وسیله مدل RSM در سال اول. محور افقی نمودارها مقدار نفوذ عمقی (DP) بر حسب میلی‌متر و محور عمودی غلظت برماید بر حسب میکروگرم بر سانتی‌متر مکعب خاک است.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]



شکل ۲. غلظت‌های اندازه‌گیری شده (نشانه‌ها) و مقادیر برازش شده (خطوط) به وسیله مدل RSM در سال دوم. محور افقی نمودارها مقدار نفوذ عمقی (DP) بر حسب میلی‌متر و محور عمودی غلظت برماید بر حسب میکروگرم بر سانتی‌متر مکعب خاک است.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]

جدول ۳. نتایج برازش مدل RSM بر داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت به صورت هم‌زمان در چهار عمق

	ε(cm)	V (cm/day)	MV	R^2	درصد برماید آب‌شویی شده (DP= 25cm)
شاهد سال اول	۰/۸۹	۱/٦۳	۲/۵۵	۰/۹۵۷	۳۳
گندم سال اول	۰/٦۸	۱/٦٤	۲/۵٦	۰/۹۵۲	۲۹
ذرت سال اول	۰/٤۲	۱/۵۷	۲/٤۵	۰/۹۳۷	۳٤
یونجه سال اول	۲/۰۷	۱/٦٤	۲/۵٦	۰/۹٦۰	۳۲/۵
شاهد سال دوم	۱/۲٦	۳/۱۱	۲/۳۷	۰/۹۹۲	۲۵
گندم سال دوم	۲/۹۳	۵/۷۹	٤/٤**	۰/۹۹۲	٤۷/٤
ذرت سال دوم	٦/۷۳**	٤/۷۸	۳/٦۳**	۰/۹۷۸	٦۷
یونجه سال دوم	۵/۵۲**	٦/۹۰	۵/۲۵**	۰/۹۸۸	۷۰

**: نشانهٔ تغییر معنی‌دار در سطح یک درصد.

تکرار استفاده شده است. به دلیل متفاوت بودن شدت آب‌شویی در سال‌های اول و دوم، نمی‌توان سرعت جریان را در دو سال با هم مقایسه کرد. بنابراین، برای مقایسه تأثیر تیمارها بر سرعت حرکت برماید از عامل بدون بعد MV استفاده می‌شود (۱۳)، که به صورت زیر است:

$$MV=V/q \qquad [٦]$$

با توجه به شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می شود که تغییرات غلظت نسبت به نفوذ عمقی روند مشخصی دارد. البته انحرافاتی نیز وجود دارد که ناشی از ناهمگنی خاک و تغییرات مکانی زیاد عوامل انتقال (V، ε) در خاک است، که قبلاً نیز به وسیله بیگار و نیلسن (۵)، رایس و همکاران (۱٤) و جینز و همکاران (۱۰) گزارش شده است.

برازش مدل بر داده‌های هر تیمار به صورت هم‌زمان در چهار عمق نمونه‌برداری انجام گرفته است تا یک مقدار معین در همه نیم‌رخ خاک برای عوامل در هر تیمار به دست آید. این کار در صورتی ممکن است که پروفیل خاک از نظر عمقی همگن فرض شود، که در شرایط آزمایش فرضی منطقی می‌باشد، ولی به هر حال باعث ایجاد انحرافاتی در برآورد می‌شود. بدیهی است اگر برازش مدل در هر عمق جداگانه صورت گیرد نتیجه بهتری به دست می‌آید، ولی این کار منجر به محاسبه چهار مقدار برای عوامل در هر تیمار می‌شود، و مقایسه تیمارها مشکل می‌گردد. ضریب تعیین بحرانی در سطح یک درصد در سال‌های اول و دوم به ترتیب ۰/٤٤۹ و ۰/٤۱۸ است، و با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که ضریب تعیین به دست آمده در تمام حالت‌ها بزرگ‌تر از ضریب تعیین بحرانی است. در نتیجه، برازش مدل بر داده‌ها در سطح یک درصد معنی‌دار و قابل قبول می‌باشد. به طور خلاصه، با مقایسه شکل‌ها و جدول ۳ نتایج زیر به دست آمده است:

MV و پراکنش‌پذیری تیمارهای گندم، ذرت و یونجه در سال اول نسبت به شاهد تغییر معنی‌داری نداشته است، چون این عوامل نشان دهنده مقدار جریان ترجیحی در خاک هستند (۱۷). بنابراین، می‌توان گفت که کشت این محصولات در سال اول تأثیر معنی‌داری بر مقدار جریان‌های ترجیحی ندارد. مقایسه MV و پراکنش‌پذیری بین شاهد سال‌های اول و دوم نیز تغییر معنی‌داری نشان نمی‌دهد.

سرعت جریان در تیمارهای ذرت، گندم و یونجه در سال دوم نسبت به شاهد، به ترتیب ۱/۵٤، ۱/۸٦ و ۲/۲۱ برابر افزایش داشته است. پراکنش‌پذیری در تیمارهای یونجه و ذرت به ترتیب ٤/۳۰ و ۵/۳۰ برابر نسبت به شاهد افزایش یافته است. افزایش این دو عامل گویای افزایش جریان‌های ترجیحی در تیمارهای تحت کشت در سال دوم است، که می‌تواند در اثر ریشه‌های عمیق و پیوسته گیاهان باشد. ریشه‌های پوسیده

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]

گیاهان سال اول نیز به دلیل ایجاد معابر فرعی در نیم‌رخ خاک می‌تواند در این افزایش تأثیر داشته باشد.

درصد برماید آب‌شویی شده از لایه ۵۰ سانتی‌متری سطح خاک، پس از ۲۵ سانتی‌متر نفوذ عمقی در بیشتر تیمارها حدود ۳۰ درصد بود، ولی در تیمارهای گندم، ذرت و یونجه سال دوم این مقدار به ترتیب ٤٧، ٦٧ و ۷۰ درصد بود. حداکثر غلظت برماید پس از ۲۵ سانتی‌متر نفوذ عمقی در تیمارهای سال اول و شاهد سال دوم در عمق ٦٠ سانتی‌متری وجود داشت. در تیمارهای گندم، ذرت و یونجه در سال دوم در شرایط فوق، حداکثر غلظت برماید در عمق ۹۰ سانتی‌متری بود، که نشان دهنده حرکت سریع‌تر برماید به عمق‌های پایین‌تر در تیمارهای تحت کشت در سال دوم است. پس نتیجه گرفته می‌شود که در کشت‌هایی که سرعت آب‌شویی در آنها زیاد است (مثل یونجه) افزودن کودهای با قابلیت آب‌شویی (مانند کودهای نیتروژنه) باید در چند نوبت صورت گیرد تا کود بیشترین کارایی را داشته باشد. هم‌چنین، در برنامه‌ریزی آب‌شویی زمین‌های شور، اگر امکان کاشت گندم (یا جو که ریشه‌ای شبیه گندم دارد ولی نسبت به شوری مقاوم است) وجود داشته باشد، کارایی آب‌شویی تا حدود ۷۰ درصد افزایش می‌یابد.

منابع مورد استفاده

۱. شعبانپور شهرستانی، م. ۱۳۷۸. انتقال املاح در شرایط مزرعه. پایان‌نامه دکتری خاک‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

2. Abdalla, N. A. and B. N. Lear. 1975. Determination of inorganic bromide in soil and plant tissues with bromide selective-ion electrode. Commun. in Soil Sci. and Plant Analysis 6: 489-494.
3. Agus, F. and D. K. Cassel. 1992. Field-scale bromide transport as affected by tillage. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 254-260.
4. Amoozegar-Fard, A., D. R. Nielsen and A. W. Warrick. 1982. Soil solute concentration distribution for spatialy varying pore water velocities and apparent diffusion coefficients. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 3-9.
5. Biggar, J. W. and D. R. Nielsen. 1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. Water Resour. Res. 12: 78-84.
6. 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.
7. 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.
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. Reginato. 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. J. Shouse. 1982. A field test of transfer function model for prediction of solute transport. Water Resour. Res. 18: 369-375.
13. Parker, J. C. and M. T. Van Genuchten. 1984. Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments. Virginia Agric. Exp. Bull. 84.
14. Rice, R. C., R. S. Bowman and D. B. Jaynes. 1985. Percolation of water below an irrigated field. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 855-859.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]

15. 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.
16. 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. Irrig. Sci. 11: 219-225.
17. Van Ommen, H. C. 1988. Transport from diffuse sources of contamination and its application to a coupled unsaturated-saturated system. Ph. D. Diss., Wageningen Agric. Univ., Wageningen, The Netherlands.
18. Wierenga, P. J. 1977. Solute distribution profiles computed with steady-state and transient water movement models. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 1050-1055.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1381.6.4.7.5]