بررسی اثر ساختمان خاک بر منحنی رخنه بروماید در شرایط رطوبتی اشباع و غیراشباع

الهام امیری[۱*]، علی اکبر محبوبی[۱]، محمد رضا مصدقی[۲] و حسین شیرانی[۳]

(تاریخ دریافت:۱۳۹۱/۰۳/۱۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۰۸)

چکیده

در این پژوهش اثر ساختمان خاک در انتقال بروماید غیرفعال تحت شرایط جریان اشباع و غیراشباع بررسی گردید. تیمارهای ساختمان خاک شامل ستون‌های خاک دست‌نخورده (ساختمان منشوری و دانه‌ای) و خاک دست‌خورده (ساختمان تک‌دانه) بودند. غلظت ثابتی از بروماید (M ۰/۰۰۵) بر سطح ستون‌ها تحت شرایط جریان ماندگار اعمال شد. برای شرایط اشباع، شدت جریانی برابر با بیشترین هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) خاک‌ها و برای ایجاد شرایط غیراشباع، شدت جریانی برابر نصف کمترین K_s روی ستون‌ها اعمال گردید. آبشویی ستون‌ها تا حجم آب خروجی ۵ حجم آب منفذی (PV) ادامه یافت. غلظت بروماید خروجی با فواصل ۰/۲PV توسط الکترود انتخابگر بروماید اندازه‌گیری شد. منحنی رخنه بروماید برای ساختمان تک‌دانه S شکل و نزدیک به الگوی جریان‌های پیستونی و موینه‌ای بود. در دو ساختمان منشوری و دانه‌ای، منحنی رخنه در ابتدا دارای شیب تند و سپس شیب ملایم‌تر و کشیده بود. مسیرهای ترجیحی موجب خروج زود هنگام بروماید از ستون‌های خاک در این دو ساختمان شد. کشیدگی منحنی رخنه بیانگر نقش مهم پخشیدگی و پراکنش در انتقال بروماید در این خاک‌ها می‌باشد. در شرایط اشباع، جبهه بروماید نسبت به شرایط غیراشباع به علت غالبیت جریان توده‌ای و جریان سریع‌تر در منافذ درشت زودتر به انتهای ستون رسید. نتایج این پژوهش اهمیت ساختمان خاک، مسیرهای ترجیحی و شرایط جریان را در انتقال املاح نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ساختمان منشوری، ساختمان دانه‌ای، ساختمان تک دانه، حجم آب منفذی، جریان ترجیحی، کشیدگی

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی‌عصر، رفسنجان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: elham1575@gmail.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]

مقدمه

در سالیان اخیر آلودگی منابع آب زیرزمینی، آب‌های سطحی و محیط زیست به‌واسطه املاح و آلاینده‌های شیمیایی در گستره وسیعی از جهان مشکل‌آفرین شده است. از اینرو موضوع حرکت املاح و آلاینده‌ها در خاک‌ها و آبخوان‌ها دارای اهمیت زیادی است و به‌همین جهت پژوهش‌های زیادی در رابطه با جنبه‌های مختلف فرایند حرکت و انتقال این مواد صورت گرفته است. محیط متخلخل خاک بستر حرکت و انتقال مواد آلاینده از سطح تا اعماق است. ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌ویژه شاخص‌های ساختمان خاک، توزیع اندازه منافذ، پیوستگی آنها در طول نیمرخ خاک، اعوجاج، هدایت هیدرولیکی و درز و ترک‌های موجود در طول نیمرخ خاک فرآیند حرکت و انتقال املاح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آنجاکه این ویژگی‌ها در رابطه با حرکت آب و مواد در خاک مهم‌اند، بنابراین ساختمان خاک اهمیت زیادی در حرکت آب و مواد در خاک دارد (۱۹).

در بحث ساختمان خاک، پیوستگی و توزیع اندازه منافذ خاک، به‌ویژه حجم و پیوستگی منافذ بزرگ‌تر از ۳۰ میکرون (برای نمونه منافذ ناشی از فعالیت ریزجانداران، درز و شکاف‌های حاصل از انقباض، و سایر منافذ بین خاکدانه‌ای) تأثیر عمده‌ای بر جریان آب و املاح در خاک دارند. در مکش‌های ماتریک نزدیک صفر عمدتاً جریان آب و املاح در منافذ متوسط و درشت رخ می‌دهد که گذرگاه‌های گمانه‌ای می‌باشند (۲۰). ساختمان خاک به‌طور غیرمستقیم بر انتشار املاح تأثیر می‌گذارد که به تغییرات مقدار رطوبت ناشی از اختلاف در توزیع اندازه منافذ مربوط می‌شود (۲). حرکت جانبی و توزیع مجدد محلول ورودی از سطح خاک و هم‌چنین حرکت املاح در منافذ درشت دو فرآیندی می‌باشند که منجر به تغییر مکانی آب و املاح در خاک ساختمان‌دار می‌شوند (۱۴). ورورت و همکاران (۱۸) انتشار پذیری در شرایط غیراشباع را به‌وسعت توزیع اندازه منافذ مربوط می‌داند که از شیب منحنی مشخصه رطوبتی به‌دست می‌آید.

شرایط رطوبتی خاک ازجمله جریان اشباع و غیراشباع و شدت جریان نیز در چگونگی حرکت املاح و آلاینده‌ها در خاک اهمیت دارد. در شرایط اشباع، جریان در منافذ درشت در انتقال املاح نقش داشته و به‌طور معنی‌داری انتشار املاح را افزایش می‌دهد. ولی در شرایط غیراشباع منافذ متوسط و ریز در انتقال آب و املاح شرکت دارند و بسته به درجه اشباع خاک، سرعت انتقال و حرکت املاح متفاوت است. هرچه درجه اشباع خاک افزایش یابد، جریان آب و درنتیجه جریان املاح نیز افزایش می‌یابد (۲). در شدت جریان‌های زیاد، حرکت املاح سریع بوده، اختلاط آب و املاح کم است و جریان روان نقش عمده را در انتقال ایفا می‌کند. در شدت جریان‌های کم، فرآیندهای پخشیدگی و پراکنش در انتقال املاح نقش دارند (۱۱).

جریان ترجیحی مانند جریان از طریق منافذ درشت و کانال‌ها و جریان انگشت- مانند می‌باشد که بیشتر در خاک‌های ساختمان‌دار دیده می‌شود (۳). میزان رطوبت خاک بر جریان ترجیحی تأثیر می‌گذارد؛ به‌همین جهت جریان ترجیحی بیشتر در خاک‌های مرطوب دیده می‌شود (۶). در پژوهش‌های انجام گرفته در مورد تعیین مسیرهای جریان ترجیحی در خاک‌های دست نخورده؛ ۱) منافذ درشت ناشی از نقل و انتقال و حرکت جانداران خاکزی، فعالیت ریشه و درز و ترک‌های ناشی از انقباض و انبساط خاک، ۲) جبهه ناپایدار رطوبتی یا جریان انگشت مانند، و۳) جریان‌های قیفی شکل که در شرایط توپوگرافی خاص و در خاک‌های لایه‌ای شیب‌دار به‌وجود می‌آید را می‌توان از دلایل عمده ایجاد جریان ترجیحی بیان کرد (۷). بوچتر و همکاران (۵) عامل انتقال سریع املاح در خاک‌های غیراشباع را به جریان ترجیحی در اثر ناهمگنی در ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، منافذ درشت، ناپایداری جریان و شرایط مرزی متغیر نسبت دادند. حرکت نامنظم املاح در خاک لایه‌ای ساختمان‌دار، ناشی از جریان ترجیحی در قسمتی از مقطع جریان خاک و جریان آهسته‌تر در قسمت‌های دیگر ذکر شده است (۱۵). به‌علاوه، این نوع جریان ممکن است با توجه به مسیر و سرعت جریان، موجب حرکت سریع املاح به زیر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]

جدول۱. ویژگی های فیزیکی خاک‌های مورد بررسی۱

نوع خاک	بافت	ρ_b ($Mg\ m^{-3}$)	ρ_s ($Mg\ m^{-3}$)	TP (% v/v)	Macrop (% v/v)	MicroP (%v/v)	MWD (mm)	Ks ($cm\ h^{-1}$)
A	شنی	۱/۵۵	۲/۵۱	۳۸/۰	۱۹/۲	۱۸/۸	۰/۰	۱۱/۶
B	لوم رسی	۱/۲۷	۲/۵۱	۴۸/۰	۱۲/۰	۳۶/۰	۲/۲	۳/۰
C	لوم رسی	۱/۱۹	۲/۳۳	۴۹/۰	۲۴/۰	۲۵/۰	۳/۸	۴/۹

A (ساختمان تک دانه)، B (ساختمان منشوری) و C (ساختمان دانه‌ای)، (ρ_b چگالی ظاهری)، (ρ_s چگالی حقیقی)، (TP تخلخل کل)، (MacroP تخلخل درشت)، MicroP (تخلخل ریز)، (MWD میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها) و (Ks ضریب آبگذری اشباع)

ناحیه فعالیت ریشه شده و در نتیجه باعث گسترش آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک گردد (۸).

اگرچه حرکت آلاینده‌ها در خاک به‌ویژه در دو دهه اخیر از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است اما هنوز نقش ساختمان خاک به‌ویژه از جنبه مقایسه انواع ساختمان‌های مختلف به‌خوبی بررسی نشده است. با توجه به نقش بسیار مهم ساختمان خاک در حرکت املاح و آلاینده‌ها در خاک‌های ساختمان‌دار، این پژوهش به‌منظور شناخت چگونگی حرکت برومید به‌عنوان ردیاب حرکت این مواد در خاک‌های با ساختمان‌های مختلف در راستای شناخت چگونگی آلودگی ناشی از انتقال این مواد به منابع آب زیرزمینی و خاک انجام شد. این مقاله با استفاده از منحنی‌های رخنه درجه اهمیت هر یک از عوامل انتقال، پراکنش، تبادل و دفع یونی را در حرکت املاح مورد بحث قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و استقرار ستون‌های آبشویی

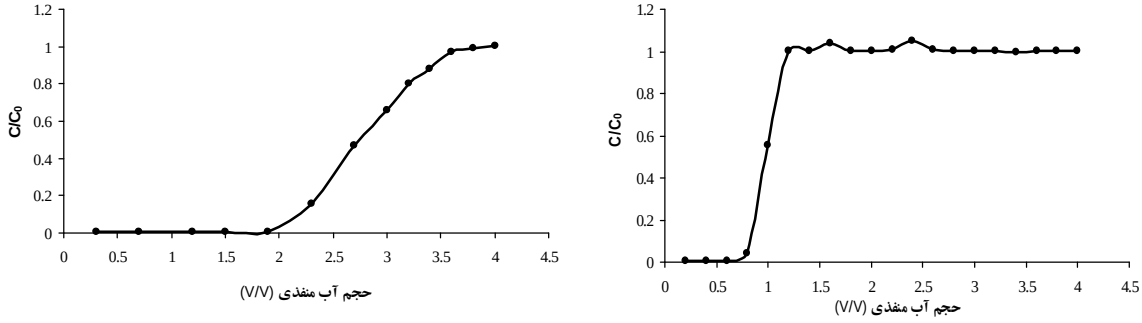
این پژوهش در شرایط آزمایشگاهی بر روی ستون‌های دست نخورده خاک با سه نوع ساختمان مختلف در شرایط اشباع و غیراشباع ماندگار انجام شد. نمونه‌برداری از زمین‌های تحت کشت غلات منطقه صالح‌آباد با رده‌بندی خاک Typic Xerofluvent (خاک A با ساختمان تک‌دانه)، منطقه بهار با رده‌بندی خاک Typic Xerofluvent (خاک B با ساختمان منشوری) و منطقه اسدآباد با رده‌بندی خاک Endoaquepts Aeric (خاک C با ساختمان دانه‌ای) در استان همدان انجام گرفت. نمونه‌گیری خاک دست‌نخورده در شرایط رطوبتی مناسب با استفاده از سیلندرهای فلزی از جنس آهن گالوانیزه به ضخامت ۳ میلی‌متر، قطر درونی ۱۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر انجام گرفت. پیش از نمونه‌گیری جداره درونی سیلندرها توسط پارافین مایع آغشته شد تا از ایجاد جریان ترجیحی در محل تماس خاک با سیلندر جلوگیری شود و اصطکاک بین خاک و جداره درونی سیلندر در هنگام نمونه‌برداری کاهش یابد. جهت آماده‌سازی ستون‌های خاک با ساختمان تک‌دانه (که ذرات دارای پیوستگی نبوده و به‌نوعی خاک بدون ساختمان را بیان می‌کند)، با توجه به حجم مشخص ستون خاک (ارتفاع ۲۵ cm و قطر درونی ۱۶ cm) و چگالی ظاهری خاک شنی ($۱/۵۵\ Mg\ cm^{-3}$)، جرم خاک موردنیاز محاسبه شده و درون ستون‌ها ریخته شد. پس از نمونه‌گیری، در زیر ستون‌های خاک یک توری فلزی بسته شده، ستون‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و درون قیف فلزی بر روی چهارپایه‌ای مستقر شدند. با اشباع کردن ستون‌های خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع آنها به‌روش بار ثابت اندازه‌گیری شد. در جدول ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها آورده شده است.

آزمایش‌های آبشویی

جهت انجام آزمایش‌های آبشویی غلظت ثابتی از برومید (M ۰/۰۰۵) بر سطح ستون‌های خاک تحت شرایط جریان ماندگار اعمال شد. برای شرایط اشباع، شدت جریانی برابر با بیشترین هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) خاک‌ها (مربوط به ساختمان

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]



(ب) (الف)

شکل ۱. منحنی رخنه حرکت برومید در ستون خاک با ساختمان تک‌دانه در شرایط جریان اشباع (الف) و غیراشباع (ب)

تک‌دانه) روی تمامی ستون‌ها اعمال شد. بنابراین در ساختمان منشوری و دانه‌ای بار آبی روی ستون‌ها ایجاد گردید. هم‌چنین در برخی از ستون‌ها با هدایت هیدرولیکی اشباع خیلی کم، مکشی از پایین ستون خاک به‌وسیله پمپ خلأ نیز اعمال شد تا شدت جریان موردنظر ایجاد شود.

برای ایجاد شرایط غیراشباع، شدت جریانی برابر نصف کمترین K_s (مربوط به ساختمان منشوری) روی ستون‌ها اعمال گردید. جهت جلوگیری از اشباع شدن، انتهای ستون‌ها تحت مکش قرار گرفت. برای یافتن این مکش، مقادیر مختلف مکش به انتهای ستون‌ها اعمال گردید و در آخر مکشی انتخاب شد که در آن در زمان‌های یکسان، حجم آب ورودی برابر حجم آب خروجی از ستون‌ها بود. کل حجم خروجی محلول برومید از ستون‌ها برابر پنج برابر حجم آب منفذی (۵PV) آنها بود که در ۲۵ زمان مساوی (با فواصل PV ۰/۲)، نمونه‌برداری شد. حجم آب منفذی (PV) برابر حجم آب موجود در یک خاک می‌باشد. حجم آب منفذی ستون‌های خاک در شرایط جریان اشباع و غیراشباع ماندگار با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$PV = \theta_v \times V_t \qquad [۱]$$

که در این رابطه: PV حجم آب منفذی بر حسب سانتی‌متر مکعب، q_v رطوبت حجمی اشباع و غیراشباع خاک برحسب سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و V_t حجم کل ستون خاک برحسب سانتی‌متر مکعب می‌باشند. نمونه‌گیری از محلول خروجی (به مقدار ۵ سانتی‌متر مکعب) پس از شروع آبشویی توسط سرنگ از طریق سه‌راهی متصل به قیف خروجی انجام شد و غلظت برومید خروجی نمونه‌ها با فواصل ۰/۲PV توسط الکترود انتخابگر برومید اندازه‌گیری شد.

منحنی رخنه برومید

در این پژوهش منحنی رخنه (BTC) برومید به‌صورت غلظت نسبی برومید (C/C_0) در برابر حجم آب منفذی (PV) تا ۵PV رسم شد و روند حرکت برومید در خاک تحت تأثیر ساختمان خاک و شرایط جریان در طول آزمایش‌های آبشویی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای رسم منحنی‌های رخنه از برنامه Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

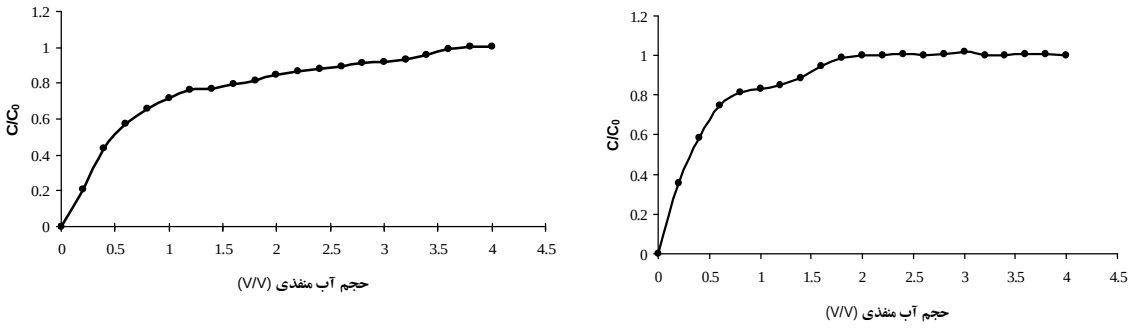
شکل منحنی رخنه به نوع ساختمان خاک و به‌تبع آن شکل هندسی منافذ، توزیع اندازه منافذ، قطر و پیوستگی منافذ و اعوجاج آنها بستگی دارد. هم‌چنین شرایط رطوبتی خاک، سرعت جریان آب، توزیع سرعت املاح و درجه اشباع خاک منحنی رخنه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اثر ساختمان تک‌دانه بر منحنی رخنه برومید

در شکل ۱.الف منحنی رخنه برومید برای ساختمان تک‌دانه تحت شرایط اشباع نشان داده شده است. منحنی رخنه در این تیمار در PV ۰/۸ آب خروجی شروع و در ۱/۲PV آب

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]



(ب) (الف)

شکل ۲. منحنی رخنه حرکت بروماید در ستون خاک با ساختمان منشوری در شرایط جریان اشباع (الف) و غیراشباع (ب)

خروجی کامل شده است. ظهور دیرهنگام بروماید در خروجی احتمالاً به این دلیل است که در زمان‌های اولیه شروع آبشویی تا ۰/۸PV جبهه آلودگی (حرکت پیستونی و مویینه‌ای) هنوز به انتهای ستون نرسیده است و غلظت بروماید در محلول خروجی بسیار ناچیز و نزدیک صفر می‌باشد. تفاوت اندک سرعت آب در منافذ این خاک احتمالاً دلیل مهم نزدیک بودن به جریان‌های پیستونی و مویینه‌ای است. شیب تند منحنی در حول و حوش ۱ =PVمی‌تواند به‌علت نقش ناچیز فرآیندهای پخشیدگی و پراکنش ناشی از توزیع یکنواخت اندازه منافذ در ساختمان تک‌دانه و توزیع یکنواخت سرعت حرکت بروماید در شرایط اشباع باشد. برتری جریان توده‌ای در این تیمار موجب شد تا جبهه بروماید خیلی زود، در ۱/۲PV از آب خروجی (پس از ۰/۴PV) به‌طور کامل به‌انتهای ستون برسد و در ۱/۰PV از آب خروجی، غلظت نسبی بروماید ۰/۵ را داشته باشد که بیان‌گر تقارن منحنی رخنه می‌باشد. از اینرو در این شرایط در حرکت بروماید، دیرآیی یا تأخیر دیده نشد که به نبود برهم‌کنش خاک و بروماید مربوط است. هم‌چنین بروماید یک رديـاب غیرفعال است، وارد واکنش‌های تبادل و رسوب نمی‌شود و جذب آن در خاک به‌ویژه در خاک‌های مورد بررسی (با pH قلیایی) بسیار کم است. منحنی رخنه S شکل و کاملاً متقارن و دارای شیب تند در C/C_0=۰/۵ بود که با نتایج شولین و همکاران هماهنگ (۱۶) بود. نتایج آنها نشان داد که منحنی رخنه برای خاک‌های همگن شنی و بسیار سبک به‌صورت S شکل می‌باشد.

شکل ۱.ب منحنی رخنه بروماید برای تیمار ساختمان تک دانه در شرایط غیراشباع را نشان می‌دهد. با توجه به شکل منحنی در این تیمار دیده می‌شود که منحنی رخنه نسبت به حالت اشباع از شکل صاف‌تر و کشیده‌تر و شیب ملایم‌تری برخوردار است. کشیده‌تر شدن منحنی و شیب ملایم آن احتمالاً به‌علت پراکنش ناشی از توزیع سرعت آب و بروماید در پیکره خاک، در شرایط غیراشباع می‌باشد. در شرایط غیراشباع، پوسته‌های ضخیم آبی شبیه منافذ بزرگ و پوسته‌های نازک آبی مشابه منافذ کوچک‌تر عمل می‌کند.

با توجه به اینکه سرعت حرکت آب و بروماید در مجراهای بزرگ‌تر نسبت به مجراهای کوچک‌تر بیشتر است، بنابراین توزیع سرعت و درنتیجه پراکنش نقش اصلی را در حرکت بروماید تحت شرایط جریان غیراشباع در این ساختمان داشته است. از طرفی چون سرعت حرکت بروماید در این شرایط کندتر است، پخشیدگی نیز مهم می‌شود. مشابه این نتیجه را در گزارش نلسن و بیگار می‌توان یافت (۱۲). پژوهش‌های آنها نشان داد که منحنی رخنه کلرید برای خاک شنی به‌علت توزیع سرعت و درنتیجه انتشار طولی در منافذ خاک از الگوی پیستونی و مویینه‌ای دور شده و شیب ملایمی پیداکرده است. در شرایط غیراشباع منحنی رخنه بروماید در ۱/۸PV آب خروجی شروع شده است که نسبت به‌حالت اشباع ۱PV تأخیر داشته است. دیرآیی بروماید نشان دهنده حرکت کندتر بروماید

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]

در شرایط غیراشباع می‌باشد (شکل ۱-الف و ب). احتمالاً دیرآیی به این دلیل است که در این شرایط، عمده جریان در منافذ ریز صورت می‌گیرد. شیب ملایم منحنی رخنه در PV های بالاتر به‌علت وجود آب غیرمتحرک در شرایط غیراشباع می‌باشد، که باعث کشیدگی منحنی رخنه شده است. منحنی رخنه در ۴PV از آب خروجی کامل شده است. در این تیمار حجم‌های آب خروجی بیشتری لازم است تا منحنی رخنه بروموید کامل شده و جبهه بروموید به‌طور کامل به انتهای ستون برسد.

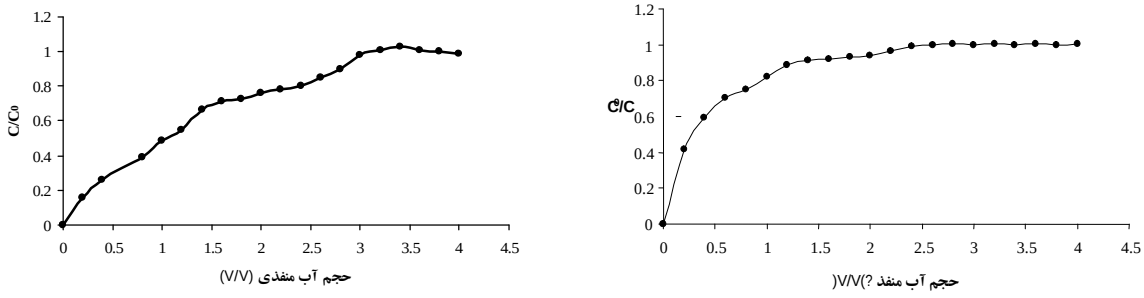
اثر ساختمان منشوری بر منحنی رخنه بروموید

منحنی رخنه بروموید در ساختمان منشوری تحت شرایط اشباع به سمت چپ و دور از محور x میل کرده است (شکل ۲.الف). در این منحنی رخنه، شیب تندی در حجم‌های آب خروجی ابتدایی(تا ۰/۸PV) و سپس شیب ملایم‌تری تا ۲PV آب خروجی دیده می‌شود. شیب تند منحنی رخنه در ابتدای آبشویی احتمالاً به‌دلیل جریان ترجیحی در درز و ترک‌های عمودی و منافذ درشت و مسیرهای ترجیحی در این ساختمان می‌باشد. این مسیرهای ترجیحی باعث شده‌اند که غلظت بروموید در ۰/۲PV آب خروجی، بسیار بیشتر از خاک شنی باشد و منحنی رخنه بروموید به‌سمت چپ و دور از محور x میل کند. هم‌چنین خروج زودهنگام بروموید در این ساختمان نسبت به ساختمان تک‌دانه به‌دلیل دفع آنیونی بروموید می‌باشد. به‌طوری‌که بروموید توسط بار منفی رس‌ها دفع و وارد مرکز منافذ شده و سریع‌تر انتقال یافته است درصورتی که در ساختمان تک‌دانه نقش دفع آنیونی به‌دلیل رس کم آن ناچیز است. شیب بسیار کم منحنی در ۰/۸PV تا ۱/۸PV آب خروجی احتمالاً به‌دلیل وارد شدن بروموید به‌درون منافذ ریز خاک، وارد شدن به آب غیرمتحرک و درنتیجه انتقال بسیار کند آن می‌باشد. ثابت شدن C/C_0 در حجم‌های آب خروجی پایانی به‌دلیل آن است که آب غیرمتحرک از بروموید اشباع شده و خاک هر آنچه به آن اضافه می‌شود را انتقال می‌دهد. در این تیمار، منحنی رخنه متقارن نیست و سطح بالا و پایین محصور بین خط عمودی PV=۱ و به‌ترتیب C/C_0=۰ و C/C_0=۱ در اطراف نقطه C/C_0=۰/۵ برابر نمی‌باشد که احتمالاً به‌دلیل تبادل و ورود و خروج بروموید در پیکره خاک در بخش متحرک و غیرمتحرک و پخشیدگی بروموید بین این دو بخش می‌باشد. نتایج به‌دست آمده با نتایج بوما هماهنگ است. نتایج این پژوهشگر نشان داد که در خاک‌های ریزبافت با منافذ صفحه‌ای و کانال‌ها، کلرید زودتر در خروجی ستون‌ها دیده می‌شود. این نتیجه به حرکت سریع کلرید در منافذ بزرگ‌تر در شرایط اشباع و حرکت خیلی کند هم‌زمان در منافذ ریز محیط نسبت داده شده است (۴). هم‌چنین استروک و همکاران با بررسی انتقال و منحنی رخنه بروموید در بلوک‌های خاک دست‌نخورده دریافتند که به‌علت جریان ترجیحی ناشی از تفاوت بافت، ساختمان، تخلخل درشت، درجه شیب زمین در بلوک‌ها، منحنی رخنه دارای شیب تند اولیه بوده است (۱۷). ما و سلیم هم گزارش کردند که جریان ترجیحی املاح در خاک‌های ساختمان‌دار موجب می‌شود که منحنی رخنه شکلی دو قسمتی داشته باشد(۹). کیزا و همکاران نیز مقادیر کم دیرآیی املاح را در سرعت‌های آب منفذی زیاد به‌دست آوردند. براساس نظر آنها در سرعت‌های زیاد آب منفذی، منافذ درشت پرشده و آب و املاح از راه این منافذ درشت حرکت می‌کنند. درنتیجه اختلاط املاح با محلول خاک کامل نیست و املاح سریع‌تر در محیط متخلخل خاک حرکت می‌کنند(۱۳).

منحنی رخنه بروموید در شرایط غیراشباع نسبت به حالت اشباع به‌سمت راست و نزدیک محور x میل کرده است شکل (۲-ب). شیب کمتر منحنی در حجم‌های آب خروجی کم به‌علت جریان ترجیحی کمتر در شرایط غیراشباع می‌باشد. منحنی در C/C_0=۰/۵ متقارن نیست و از این نظر مشابه شرایط اشباع می‌باشد. کشیدگی منحنی نسبت به منحنی رخنه بروموید در شرایط اشباع بیشتر شده است، که احتمالاً به‌دلیل نقش بیشتر پخشیدگی و انتشار می‌باشد. پخشیدگی و انتشار را می‌توان به توزیع گسترده اندازه منافذ در خاک ریزبافت، درصد رس و اعوجاج زیاد منافذ آن نسبت داد. دنباله‌دار شدن منحنی رخنه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]



(ب) (الف)

شکل ۳. منحنی رخنه حرکت بروماید در ستون خاک با ساختمان دانه‌ای در شرایط جریان اشباع (الف) و غیراشباع (ب)

به‌دلیل آزاد شدن آهسته بروماید از بخش غیرمتحرک می‌باشد. پخشیدگی باعث انتقال بروماید به‌درون یا خارج از بخش آب متحرک شده است. اندرسون و بوما با استفاده از یون کلر به‌عنوان یک ردیاب، منحنی رخنه دو نوع خاک با بافت مشابه و ساختمان متفاوت (ساختمان منشوری و ساختمان شبه بلوکی) را مقایسه و گزارش کردند که منحنی رخنه خاک با ساختمان منشوری دارای شیب تند بوده، درحالی‌که منحنی رخنه خاک با ساختمان شبه بلوکی به‌صورت متقارن و پخشیده است. آنها وجود منافذ پیوسته و عبور نسبتاً آهسته آب از خاکدانه‌ها را عامل تقارن و پخشیدگی منحنی رخنه این ساختمان دانستند (۱). تحت شرایط غیراشباع به‌دلیل فرآیندهای توأم پخشیدگی و پراکنش و جریان ترجیحی در منافذ درشت پیوسته، سرعت حرکت بروماید در ساختمان منشوری، در مقایسه با ساختمان تک‌دانه بیشتر بوده و درنتیجه بروماید زودتر در خروجی ستون‌ها دیده شد (مقایسه شکل‌های ۱-ب و۲-ب).

به‌علت نقش عمده منافذ ریز در انتقال بروماید و درنتیجه سرعت کندتر بروماید در شرایط غیراشباع، منحنی رخنه در ۴PV آب خروجی نسبت به حالت اشباع (۲PV) با فاصله زمانی بیشتری کامل شده است.

اثر ساختمان دانه‌ای بر منحنی رخنه بروماید

منحنی رخنه بروماید در ساختمان دانه‌ای تحت شرایط اشباع در ۰/۲PV از آب خروجی شیب بسیار تندتری نسبت به ساختمان منشوری دارا می‌باشد (شکل ۳- الف)، که احتمالاً در ساختمان دانه‌ای به‌دلیل تخلخل کل زیاد، کانال‌های حاصل از رشد ریشه و پیوستگی بیشتر منافذ، سرعت حرکت بروماید در حجم‌های آب خروجی ابتدایی بسیار سریع بوده و مقدار زیادی بروماید نسبت به دو خاک منشوری و تک‌دانه خارج شده است. این حالت نشان دهنده این است که مقدار زیادی از بروماید توسط جریان ترجیحی در مسیرهای ترجیحی عبور کرده است. جریان‌های ترجیحی و دفع آنیونی بروماید در این خاک موجب زودآیی بروماید شده است. شیب کمتر منحنی در اواخر آبشویی تا ۴PV نشان دهنده ثابت شدن C/C_0 در حجم‌های آب خروجی پایانی است که به‌دلیل اشباع شدن آب غیرمتحرک از بروماید می‌باشد و محلول بروماید ورودی به خاک به‌طور کامل از آن عبور می‌کند. این نتایج با یافته‌های رز و جوری هماهنگی دارد. آنها نشان دادند که الگوی جریان املاح در خاک‌های ساختمان‌دار و لایه‌ای مزرعه، بسیار نامنظم بوده و دلیل آن را جریان ترجیحی املاح در بخش ساختمان درشت و جریان کندتر در بخش باقی‌مانده، را به علت پخشیدگی املاح درون خاک بیان کردند (۱۵).

همان‌طور که در شکل ۳-ب دیده می‌شود؛ در ساختمان دانه‌ای تحت شرایط غیراشباع، غلظت بروماید در زه‌آب ستون در حجم‌های آب خروجی اولیه نسبت به‌حالت اشباع کمتر است که به‌دلیل حرکت کندتر آب و بروماید می‌باشد. در شرایط غیراشباع منافذ ریز در انتقال شرکت می‌کنند، سرعت حرکت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]

آب و بروميد در آنها کمتر مـی‌باشـد و در حجـم آب خروجـی بیشتری نسبت بـه‌حالـت اشـباع مقـدار مشخـصی از بروميـد از ستون خاک خارج شده است. از طرفی شیب کم منحنـی رخنـه در مراحل بعدی آبشویی به‌دلیل ورود بروميد به‌درون منافذ ریـز درون خاکدانه‌ها می‌باشد. میشل و همکاران گزارش کردنـد کـه در شـرایط غیراشـباع منافـذ درشـت خـاک در انتقـال شـرکت نمی‌کنند، بنابراین مسیرهای سریعی برای انتقال املاح در خاک وجود ندارد. دیده می‌شود که C/C_0 بروميد در حجـم‌هـای آب خروجی ۳PV و۳/۲PV بیش‌تر از یک شده اسـت کـه احتمـالاً به‌دلیل آزاد شدن بروميد از بخش آب غیرمتحرک می‌باشد (۱۰). در این تیمار، منحنی رخنه از کشیدگی بیشتری نسبت به منحنی رخنه در ساختمان منشوری برخوردار بود. با توجـه بـه درصـد کمتر منافذ ریز در این خاک که نقش عمده را در انتقـال تحـت شرایط غیراشباع دارند، سرعت حرکـت بروميـد در ایـن تیمـار کندتر بوده و درنتیجه غلظت نسبی بروميد به‌صـورت تـدریجی افزایش یافته و شیب منحنی رخنه ملایم‌تر شده است.

در حالت غیراشباع جبهه بروميد در حجم‌های آب خروجی بیشتر نسبت به شرایط اشباع، به‌طـور کامـل بـه انتهـای سـتون رسیده و منحنی رخنه در ۴PV از حجم آب خروجی کامل شده است. بنابراین زمان لازم برای کامل شدن منحنی رخنـه بروميـد در این شرایط بیشتر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر انواع ساختمان خاک بر منحنی رخنه بروميـد در شرایط جریان اشباع و غیراشباع بررسی شـد. منحنـی رخنـه بروميد برای ساختمان تک‌دانه به شـکل S شـکل و نزدیـک بـه الگوی جریان پیستونی و موینه‌ای بود که نقـش غالـب جریـان توده‌ای را در انتقال بروميد در این نـوع سـاختمان خـاک نـشان می‌دهد. در دو ساختمان منـشوری و دانـه‌ای، منحنـی رخنـه در ابتدا دارای شیب تند و سپس شیب ملایـم‌تـر و کـشیدگی بـود. پایداری سـاختمان و مـسیرهای ترجیحـی موجـب خـروج زود هنگام بروميد از سـتون‌هـای خـاک در ایـن دو سـاختمان شـد. کشیدگی منحنی رخنه بیان‌گر نقش مهـم پخـشیدگی عرضـی و پراکنش در انتقال بروميد در این خاک‌هـا مـی‌باشـد. در شـرایط اشباع، جبهه بروميد نسبت به‌شرایط غیراشـباع بـه‌علـت برتـری جریان توده‌ای و جریان سـریع‌تـر در منافـذ درشـت زودتـر بـه انتهـای سـتون رسـید. در شـرایط غیراشـباع، منحنـی رخنـه در ساختمان تک‌دانه، دیرآیی بروميد و در دو ساختمان منـشوری و دانه‌ای زودآیی بروميد را نشان داده است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از گروه خاک‌شناسی دانـشکده کـشاورزی دانـشگاه بوعلی سینا همدان و دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان کـه در انجـام این پژوهش ما را یاری نموده‌اند و از همکاری مرکـز تحقیقـات کشاورزی استان همدان تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

1. Anderson, J. L. and J. Bouma. 1977. Water movement through pedal soils: I. Saturated flow. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 413-418.
2. Bejat, L., E. Perfect, V. L. Quisenberry, M. S. Coyne and G. R. Haszler. 2000. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 818-826.
3. Beven, K. and P. German. 1982. Macropores and water flow in soils. Water Resour. Res. 18: 1311-1325.
4. Bouma, J. 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. Adv. Agron. 46: 1-35.
5. Buchter, B., C. Hinz, M. Flury and H. Flühler. 1995. Heterogeneous flow and solute transport in an unsaturated stony soil monolith. Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 14-21.
6. Flury, M., H. Flühler, W.A. Jury and J. Leuenberger. 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. Water Resour. Res. 30: 1945-1954.
7. Forrer, I., A. Papritz, R. Kaste, H. Flühler and D. Luca. 2000. Quantifying dye tracers in soil profiles by image

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]

processing. Eur. J. Soil Sci. 51: 313-322.
8. Goss, M. J., K. S. Rollins, K. McEwan, J. R. Shaw and H. Lammers Helps. 2002. The management of manure in Ontario with respect to water quality. (Commissioned Paper No. 6). *In*: The Walkerton Inquiry. Quens Printer for Ontario. Ontario Ministry of the Attorney General, Toronto, Ont.
9. Ma, L. and H. M. Selim. 1994. Tortuosity, mean residence time, and deformation of tritium breakthroughs from soil columns. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1076-1085.
10. Michels, A., S. Gäth and P. Kämpfer. 2004. Transport of microorganisms and particles in unsaturated soil under different management practices. http:// www. uni-giessen.de/ilr/gaeth/index.html.
11. Nielsen, D. R. and J.W. Biggar. 1960. Miscible displacement in soil. 1. Experimental information. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 25: 1-5.
12. Nielsen, D. R. and J.W. Biggar. 1962. Miscible displacement: IV. Mixing in glass beads. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30:10-13.
13. Nked-Kizza, P., J. W. Biggar, M. Th. van Genuchten, P. J. Wierenga, H. M. Selim, J. M. Davidson and D. R. Nielsen. 1983. Modelling tritium and chloride 36 transport through an aggregated Oxisol. Water Resour. Res. 20: 886-872.
14. Poletika, N. N. and W. A. Jury. 1994. Effects of soil management on water flow distribution and solute dispersion. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 999-1006.
15. Roth, K. and W. A. Jury. 1991. Transport of chloride through an unsaturated field soil. Water Resour. Res. 27: 2533-2541.
16. Schulin, R., P. J. Wierenga, H. Flühler and J. Leuenberger. 1987. Solute transport through a stony soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 36-42.
17. Strock, J. S., D. K. Cassel and M. L. Gumpertz. 2001. Spatial Variability of water and bromide transport through variably saturated soil blocks. Soil Sci. Soc. Am. J. 65: 1607-1617.
18. Vervoort, R. W., D. E. Radcliffe and L. T. West. 1999. Soil structure development and preferential solute flow. Water Resour. Res. 35: 913-928.
19. White, R. E. 1985. The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matters through soil. Adv. Soil Sci. 3: 94-120.
20. White, W. M. 1993. Dry aggregate distribution. PP. 659-662. *In:* M. R. Carter (Ed.), Manule on Soil Sampling and Methods of Analysis. CRC Press, Boca Raton, FL.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]

J. Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour., Water and Soil Sci., Vol. 18, No. 68, Summer 2014, Isf. Univ. Technol., Isf., Iran.

Breakthrough Curve of Bromide as Affected by Soil Structure in Saturated and Unsaturated Conditions

E. Amiri[1]*, A. A. Mahboubi[1], M. R. Mosaddeghi[2] and H. Shirani[3]

(Received: Jun. 05- 2012; Accepted: Feb. 26-2013)

Abstract

In this study, the effect of soil structure under saturated and unsaturated flow conditions on nonreactive bromide (BR) transport was investigated. The soil structure treatments consisted of undisturbed columns (prismatic and granular structures), and disturbed columns (single- grain structure). A constant concentration (C0= 0.005 M) of bromide was supplied on the surface of the columns in a steady-state flow condition. For the saturated flow condition, a flux equal to the highest saturated hydraulic conductivity (K_s) of the columns was applied on all of the columns. To create the unsaturated flow condition, a flux equal to the half of the lowest K_s of the columns was imposed on all of the columns.
The leaching of the columns was followed for five pore volumes (5PV) and the bromide concentration of the effluent was measured at 0.2PV intervals using bromide selective electrode. The breakthrough curve (BTC) of single- grain structure was sigmoidal (S-shaped) and similar to piston-capillry flow form. In contrast, BTCs of the granular and prismatic structures had a steep initial part and later gradual tailed part. The preferential pathways caused the early appearance of bromide in the leachate of columns of these two structures. Tailing of the BTCs might be due to dispersion and diffusion between mobile and immobile water fractions. In saturated condition, the bromide plume appeared earlier than that in the unsaturated condition because of domination of mass flow and rapid macroporous stream. The results demonstrated the importance of soil structure, preferential pathways, and flow conditions in solute and pollutant transport.

Keyword: Prismatic structure, Granular structure, Single- grain structure, Pore volume, Preferential flow, Tailing.

1. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran.
2. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Isf. Univ. Technol., Isfahan, Iran.
3. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Vali-Asr Univ., Rafsanjan, Iran.
*: Corresponding Author, Email: elham1575@gmail.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.68.11.6]