

بررسی برخی شاخص های کمی و کیفی جریان ترجیحی در ساختمان های مختلف خاک

نوشین رضائی^{۱*}، احمد لندی^۲، عبدالرحمن برزگر^۳ و غلامعباس صیاد^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲)

(تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۱)

چکیده

جریان ترجیحی با ایجاد مسیری مستقیم و سریع برای انتقال آلاینده ها، آلودگی آب های زیرزمینی را به دنبال دارد. به همین منظور، این مطالعه با هدف بررسی و مقایسه برخی شاخص های کمی و کیفی جریان ترجیحی در ساختمان های مختلف خاک، در استان لرستان صورت گرفت. مطالعه به صورت آزمایشگاهی و بر روی ستون های دست نخورده با سه نوع ساختمان مختلف (دانه ای، مکعبی و فشرده) و یک خاک دست خورده در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) و با ۳ تکرار صورت گرفت. به منظور رسم منحنی رخنه در هر ساختمان خاک، تزریق بروماید با غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر توسط دستگاه نفوذسنج مکشی تحت مکش ۱۵- میلی متر به ستون های خاک صورت گرفت. منحنی رخنه بروماید ساختمان های مختلف رسم و بر اساس آن، شاخص های کمی جریان ترجیحی از قبیل شاخص میانگین زمان منحنی رخنه (M_1) و شاخص چولگی منحنی رخنه (S) محاسبه شدند. همچنین به منظور بررسی کیفی و مشاهده مسیرهای جریان ترجیحی، آزمایش نفوذ ماده ردیاب رنگی و پردازش تصاویر در ستون های مختلف خاک انجام شد. نتایج نشان داد که نوع ساختمان خاک تأثیر معنی داری بر وقوع جریان ترجیحی در خاک های مختلف مورد مطالعه داشت. مقایسه شکل منحنی های رخنه ساختمان های مختلف، وقوع جریان ترجیحی را در خاک های با ساختمان مکعبی و دانه ای و عدم وقوع این پدیده را در خاک های با ساختمان فشرده و دست خورده به خوبی نشان داد. همچنین شاخص میانگین زمان رخنه (۰/۲ و ۰/۳۹) و شاخص چولگی منحنی رخنه (۱/۱۷ و ۱/۴۵) به ترتیب در ساختمان های مکعبی و دانه ای تأیید کننده وقوع جریان ترجیحی در این خاک ها بودند. نتایج حاصل از پردازش تصویر نشان داد که عمق نفوذ ماده ردیاب رنگی در خاک با ساختمان مکعبی به ترتیب ۲۹، ۶۲ و ۷۰ درصد بیشتر از خاک های با ساختمان دانه ای، فشرده و خاک دست خورده بود که نقش نوع و توسعه ساختمان را در ایجاد جریان ترجیحی نشان داد.

واژه های کلیدی: شاخص چولگی، ماده ردیاب رنگی، میانگین زمان رخنه

رضائی ن.، لندی ا.، برزگر ع. ا.، صیاد غ. ع.، ۱۳۹۹. بررسی برخی شاخص های کمی و کیفی جریان ترجیحی در ساختمان های مختلف خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۳. صفحه: ۸۳-۹۵.

۱- دانشجوی اسبق دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز (مکاتبه کننده)

۲- استاد پیدایش و رده بندی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- دانشیار فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

* پست الکترونیک: Ramezani_nooshin@yahoo.com

مقدمه

جریان عبوری از منافذ درشت و همچنین ماتریکس خاک را به خوبی نشان دهد. روش های نفوذ ماده ردیاب رنگی و پردازش تصاویر با یکدیگر به کار رفته تا هم نقش ساختمان خاک ارزیابی شود و هم فرآیندهای جریان ترجیحی قابل دیدن باشد (Flury & Flühler, 1994).

بررسی و کمی کردن میزان انتقال املاح از اراضی کشاورزی به آب های زیرزمینی و سطحی به منظور اصلاح روش های مدیریتی کشاورزی و کنترل آلودگی آب های زیرزمینی ضروری است و جریان ترجیحی در پدیده های انتقال فوق نقش کلیدی دارد. دانستن ماهیت جریان آب عبوری از منافذ درشت خاک برای مدیریت صحیح و استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی لازم است تا بتوان از حرکت سریع آب و املاح که باعث آلودگی آب های زیرزمینی می شود، جلوگیری کرد. از طرف دیگر، با توجه به نقش بسیار مهم ساختمان خاک در حرکت آب، املاح و آلاینده ها، در خاک های ساختمان دار، بررسی جریان ترجیحی و چگونگی انتقال املاح به خاک و منابع آب زیرزمینی، در بهبود روش های مدیریتی و کاهش آلودگی آب های زیرزمینی بسیار کاربردی و سازنده خواهد بود. در نتیجه، این مطالعه با هدف بررسی و مقایسه برخی شاخص های کمی (میانگین زمان رخنه و و چولگی منحنی رخنه) و کیفی (آزمایش نفوذ ماده ردیاب رنگی) جریان ترجیحی در ساختمان های مختلف خاک انجام شد.

مواد و روش ها

این مطالعه در منطقه بیاتان از توابع شهرستان بروجرد واقع در دشت سیلاخور بالا در استان لرستان انجام شد. علت انتخاب منطقه مورد نظر، وجود ۳ نوع ساختمان متفاوت و قابل تفکیک در اعماق مختلف و با اقلیم، مواد مادری و بافت مشابه بود. بنابراین جریان ترجیحی در ساختمان های مختلف، در شرایط مشابه و به طور کمی و کیفی ارزیابی و مقایسه شدند.

بیاتان در شمال شرق شهر اشترینان و هم مرز با شهرستان ملایر در استان همدان، در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۱). جدول ۱ ویژگی-

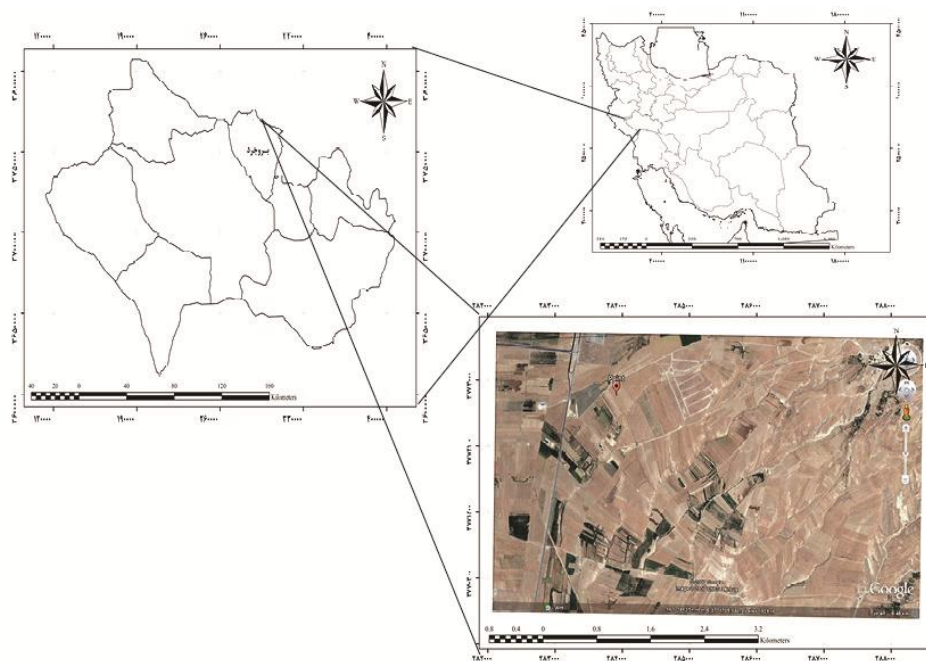
جریان ترجیحی حرکت سریع آب و املاح از شکاف های موجود در محیط متخلخل خاک است و در نتیجه زمان رسیدن آلاینده ها به آب های زیرزمینی و آبخوان ها را کاهش می دهد (Pales, 2017). ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2016)، بیان کردند که جریان ترجیحی به عنوان یک کاتالیزور برای حرکت سریع آب، املاح و آلاینده ها از قبیل آفت کش ها، عناصر غذایی، فلزات سنگین، پاتوژن ها، رادیونوکلیئیدها، میکروبوکس ها و مایعات با فاز غیرمحلول عمل می کند. این جریان با ماتریکس خاک فعل و انفعالات کمی دارد و کیفیت آب های زیرزمینی را به طور قابل توجهی کاهش می دهد. از طرف دیگر، ساختمان خاک نقش بسیار مهمی در حرکت آب و انتقال املاح دارد. خاکدانه ها و فعالیت های بیولوژیکی خاک، تعداد زیادی منافذ فعال هدایت کننده آب که عمدتاً ایجاد کننده مسیرهای ترجیحی حرکت آب در خاک هستند را به وجود می آورند (Jiang & Shao., 2014).

جریان ترجیحی می تواند با استفاده از شاخص های کمی (Quantity Indices) و شاخص های کیفی (Quality Indices) توصیف کننده وقوع جریان ترجیحی مورد بررسی قرار گیرد. شاخص های کمی توسط منحنی رخنه و شاخص کیفی با رنگ آمیزی مسیرهای جریان با مواد رنگی قابل تمایز با رنگ زمینه خاک، به دست می آیند. منحنی رخنه یا انحنا^۱ (BTC) یکی از روش هایی است که می توان برای مشخص کردن حضور و یا عدم حضور ماکروپورها در ستون های خاک از آن استفاده کرد. همچنین اثر خصوصیات ماکروپورها بر جریان آب و انتقال املاح را می توان با استفاده از منحنی رخنه و کاربرد ردیاب های مختلف از قبیل بروماید، ارزیابی کرد (Sheng *et al.*, 2014). آزمایش نفوذ ماده ردیاب رنگی و پردازش تصویر، به عنوان یکی دیگر از روش های ارزیابی جریان ترجیحی، به صورت شیوه ای رایج برای توصیف جریان آب در خاک درآمده است. علی و همکاران (Ali *et al.*, 2018)، جریان ترجیحی را در خاک های رتی-سول با استفاده از ماده ردیاب رنگی بررسی کردند و بیان کردند که استفاده از ماده ردیاب رنگی می تواند

1. Breakthrough Curve

می‌دهد.

های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه را نشان



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی در استان لرستان

Figure 1. The location of studied area in Lorestan province and Iran

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد مطالعه

Table 1. Some chemical and physical properties of studied soil

Texture	Clay	Silt	Sand	Porosity	Organic Matter	CaCO ₃	MWD	Bulk Density	EC	SAR	pH
				(%)			(mm)	(Mg m ⁻³)	(dS m ⁻¹)		
Loam	26.30	33.75	39.73	53.80	0.76	9.53	1.07	1.22	0.38	1.01	7.09

(pH: Soil reaction, EC: Electrical Conductivity, SAR: Sodium Adsorption Ratio, MWD: mean weight diameter)

قطر دستگاه نفوذسنج مکشی) و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر (متناسب با اندازه هر عمق خاک مورد مطالعه) تهیه شدند. پیش از نمونه‌گیری، جداره درونی ستون‌ها توسط پارافین 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 (Amiri *et al.*, 2014). جهت سهولت فروروی لوله‌ها در هر عمق خاک، لبه آن‌ها از طرف خارج تیز شده و سپس لوله‌ها به آرامی و با فشار دست وارد خاک شدند. برای نفوذ آسانتر لوله‌ها به درون خاک، همزمان با ورود لوله‌ها، مرتباً خاک اطراف آنها حفاری و تخلیه گردید. پس از پر شدن استوانه از خاک، دهانه لوله‌ها با توری پوشیده شدند تا از ریزش خاک از انتهای ستون‌ها جلوگیری شود (Dousset *et al.*, 2007). به-

مطالعه در شرایط آزمایشگاهی بر روی یک ستون دست-خورده (Disturbed) و سه ستون دست‌نخورده (Undisturbed) (در مجموع ۴ تیمار و هرکدام ۳ تکرار) انجام شد. تجزیه واریانس به روش مدل خطی عمومی (Generalized Linear Model) GLM و با استفاده از طرح کاملاً تصادفی (Completely Randomized Design) در ساختمان‌های مختلف خاک به‌عنوان تیمار اصلی توسط نرم افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. ستون‌های دست-نخورده شامل سه نوع ساختمان دانه‌ای (Granular)، ساختمان مکعبی (Blocky) و فشرده (Massive) بودند. نمونه‌های دست‌نخورده از سه عمق ۰-۲۵ (دانه‌ای)، ۲۵-۵۰ (مکعبی) و ۵۰-۷۵ سانتی‌متری (فشرده) تهیه شدند. به‌منظور تهیه این ستون‌ها، لوله‌های پلی‌اتیلن به ضخامت ۳ میلی‌متر با قطر ۲۵ سانتی‌متر (متناسب با

صورت جریان اشباع ماندگار و با بار آبی ثابت به صورت یکنواخت تا پایان آزمایش انجام شد. در هر ستون در ارتفاع ۷ سانتی متری بالای سطح خاک، مجرای خروجی برای خروج آب اضافی تعبیه شد. به طوری که شدت اضافه شدن آب، بیشتر از سرعت نفوذ آب در خاک بود. بنابراین، در طول مدت آزمایش، ارتفاع ثابتی از آب روی خاک وجود داشت (تخلیه مقدار اضافی آب توسط مجرای خروجی صورت می گرفت). در طول مدت زمان آبیویی، محلول های خروجی حاصل از آبیویی در حجم های مختلف (بر اساس حجم منفذی) جمع آوری و غلظت بروماید مربوط به هر نمونه توسط الکترومد انتخابگر بروماید مدل (Ion Meter/ Metrohm 692) اندازه گیری شد. در هر ساختمان خاک، منحنی رخنه بر اساس نسبت تغییرات غلظت بروماید (نسبت غلظت نهایی به غلظت اولیه، $\frac{C}{C_0}$) به زمان های مختلف و یا حجم منفذی (Pore Volume) رسم شدند و برای محاسبه شاخص های کمی جریان ترجیحی به کار برده شدند.

در مطالعات گوناگون از شاخص های کمی مختلفی برای بررسی جریان ترجیحی استفاده شده است. در این مطالعه، از دو شاخص میانگین زمان رخنه (Mean Breakthrough Time) و چولگی منحنی رخنه (Breakthrough Curve Skewness) برگرفته شده از مطالعات لی و همکاران (Lee et al., 2001)، کامرا و لنارتز (Kamra & Lennartz, 2005) و همکاران (Koestel et al., 2011) برای بررسی جریان ترجیحی استفاده شد.

میانگین زمان رخنه (μ^1) بیانگر میانگین زمان یا تعداد حجم منفذی لازم برای خروج ردیاب تزریق شده به ستون خاک، در طی آبیویی می باشد. این شاخص به عنوان گشتاور اول منحنی رخنه توسط (رابطه ۱) محاسبه شد (Lee et al., 2001):

(۱)

$$\mu_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i (x_i - \bar{x})^r$$

که r مرتبه گشتاور، n تعداد داده ها، \bar{x} میانگین داده های برحسب حجم منفذی (P_v) و Y_i داده های غلظت خروجی برحسب غلظت نسبی (C/C_0) می باشد. کامرا و لنارتز (Kamra & Lennartz, 2005)، بیان کردند که

منظور تهیه ستون های دست خورده خاک از هر عمق، مقداری خاک کافی با بیلچه برداشته و با یکدیگر مخلوط شدند. پس از هوا خشک کردن و کوبیدن ملایم و عبور از الک ۲ میلی متری، درون لوله های PVC به نحوی پر شد که جرم مخصوص ظاهری آن برابر با جرم مخصوص خاک دست نخورده گردید. مانند ستون های دست نخورده، جهت جلوگیری از وقوع جریان مستقیم محلول از فضای بین دیواره ستون خاک و لوله PVC، قبل از پر شدن لوله ها، جدار داخلی آنها با پارافین مذاب آغشته گردید. بعد از پر شدن ستون ها، به منظور نشست خاک و رسیدن به ارتفاع مورد نظر، ستون ها در چند مرحله از سمت پایین ستون و به صورت تدریجی اشباع و سپس خشک شدند. سرانجام ستون های دست خورده و دست نخورده به منظور جلوگیری از تبخیر آب و خشک شدن خاک، بطور کامل در پلاستیک پوشانده شدند و به آزمایشگاه منتقل و بر کیف های نصب شده روی سه پایه های فلزی قرار داده شدند. قبل از شروع آزمایش، هر کدام از ستون های خاک به مدت ۲۴ ساعت در تشت های آب قرار گرفتند و به طور کامل اشباع شدند. به منظور خروج بهتر هوای محبوس و اشباع کامل، فرآیند اشباع شدن ستون ها به صورت تدریجی و از سمت پایین به بالا توسط بار آبی ایجاد شده در انتهای ستون ها صورت گرفت. ستون های اشباع شده به مدت ۴۸ ساعت بر روی سه پایه های فلزی قرار گرفتند تا آب اضافی از انتهای آن ها زهکشی و خارج شده و رطوبت نزدیک ظرفیت مزرعه (مکش ۳۳۰ میلی متر) حاصل شود. ۵۰ میلی گرم بر لیتر پتاسیم به صورت پتاسیم بروماید (چگالی ۲/۷۵ g/cm³ در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و جرم مولکولی gr/mol ۱۱۹/۰۱) توسط دستگاه نفوذسنج مکشی ساخت ایالات متحده آمریکا (شرکت Soil Measurement Systems LLC, TUCSON, ARIZONA 85704 USA با قطر صفحه ۲۰ سانتی متر و تحت مکش ۱۵- میلی متر (Muller et al., 2014) در شرایط یکسان به هر ستون اضافه گردید (دستگاه نفوذسنج مکشی برای اندازه گیری پارامترهای هیدرولیکی در خاک استفاده می شود که موجب می شود ساختمان خاک در حین آزمایش حفظ شود و از بهم خوردگی و مسدود شدن منافذ خاک جلوگیری شود). بعد از تزریق بروماید، دستگاه نفوذسنج از روی ستون خاک برداشته شد و آبیویی ستون ها به



شکل ۲- نحوه تزریق ماده ردیاب رنگی به خاک توسط دستگاه نفوذسنج مکشی

Figure 2. Method of injection of dye tracer into the soil using a tension infiltrometer

نتایج و بحث

شکل‌های ۳ و ۴ منحنی‌های رخنه (BTCs) بروماید را در ساختمان‌های مختلف نشان می‌دهند. در این شکل-ها، منحنی‌های رخنه به صورت نسبت غلظت بروماید در محلول خروجی (C) به غلظت آن در محلول ورودی (C₀) در مقابل حجم منفذی (V₀) رسم شده است. منحنی‌های هر خاک حاصل میانگین سه تکرار بود. در خاک‌های با ساختمان مکعبی و دانه‌ای، منحنی رخنه بروماید به ترتیب در ۰/۲ و ۰/۴ حجم منفذی شروع و در حجم‌های منفذی ۰/۶ و ۰/۸ به اوج رسیدند (شکل ۳). در این دو ساختمان، منحنی رخنه نامتقارن و دارای شیب بسیار تندتری نسبت به ساختمان‌های دیگر بود. در ساختمان مکعبی، به دلیل منافذ درشت و پیوستگی بیشتر منافذ و احتمالاً کانال‌های حاصل از رشد ریشه که قابل رؤیت بود، سرعت حرکت بروماید در حجم‌های آب خروجی ابتدایی بسیار سریع بوده و مقدار بیشتری نسبت به ساختمان‌های دیگر خارج شد. اما در خاک‌های با ساختمان مکعبی کندتر و در حجم منفذی بیشتری صورت گرفت. عدم انطباق بیشتر در منحنی رخنه ساختمان مکعبی می‌تواند به ترکیبات ساختمانی این نوع خاک نیز نسبت داده شود. تحقیقات مورفولوژیکی نشان داده است که ساختمان دانه‌ای عمدتاً از خاکدانه‌های کروی کوچک تا متوسط تشکیل شده است،

مقدار عددی ۰/۵ یا کمتر برای μ_1 نشان دهنده وجود جریان ترجیحی می‌باشد.

در حالت ایده‌آل، در یک خاک همگن، در صورتی که املاح هیچ واکنشی با خاک نداشته باشند، منحنی رخنه آنها تقریباً متقارن است. بدیهی است عدم واکنش بین گونه نمک (یون یا مولکول) در حال انتقال، همواره صادق نیست. در شرایط طبیعی، ممکن است کنش‌ها و واکنش‌های مختلفی صورت گیرد که نتیجه آن، نامتقارن بودن منحنی رخنه و تمایل آن به سمت راست یا چپ خواهد بود. برای مشخص کردن شاخص چولگی (S) و درجه کشیدگی (یا عدم تقارن) منحنی رخنه، ابتدا با استفاده از (رابطه ۱) گشتاور مرتبه دوم و سوم محاسبه، سپس توسط (رابطه ۲) شاخص S محاسبه گردید (Koestel et al., 2011).

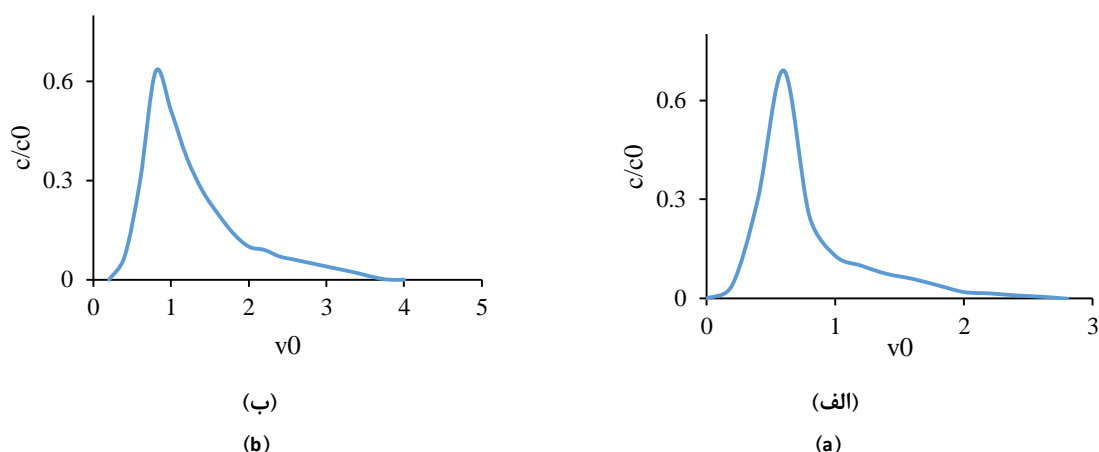
(۲)

$$S = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}$$

کامرا و لنارتز (Kamra & Lennartz, 2005)، مقدار عددی یک یا بیشتر برای S را نشان دهنده وجود جریان ترجیحی برشمردند. آزمایش نفوذ ماده ردیاب رنگی به عنوان یک شاخص کیفی و به منظور مشاهده مسیرهای جریان ترجیحی، در ستون‌های مختلف خاک انجام شد. پس از آبخوبی بروماید، ماده ردیاب رنگی بریلینانت بلو اف سی اف با غلظت ۴ گرم در لیتر توسط دستگاه نفوذسنج مکشی تحت مکش ۱۵- میلی‌متر و به اندازه یک مخزن نفوذسنج (۹۰۰ میلی‌لیتر) به هر ستون اضافه شد (شکل ۲). سپس به مدت ۷۲ ساعت به ستون‌ها اجازه داده شد که زهکشی شده و آب و ماده رنگی از ستون خارج شود. بعد از آن، ستون خاک از لوله خارج شده و با استفاده از چاقو برش‌های طولی زده شده و با استفاده از دوربین حرفه‌ای با درجه وضوح بالا عکس گرفته شد (Doussset et al., 2007). تصاویر گرفته شده در مجموع توسط نرم افزار متلب (Matlab) پردازش شدند. با استفاده از پردازش تصاویر مسیرهای جریان ماده ردیاب رنگی به الگوهای جریان تبدیل شده و رنگی کل سطح مورد نظر به سطح کل هر ستون خاک به-صورت کمی (درصد) و عمق نفوذ ماده ردیاب رنگی محاسبه گردید.

جریان جانبی است که بین منافذ بین خاکدانه های و درون خاکدانه های رخ می دهد (Ersahin *et al.*, 2002).

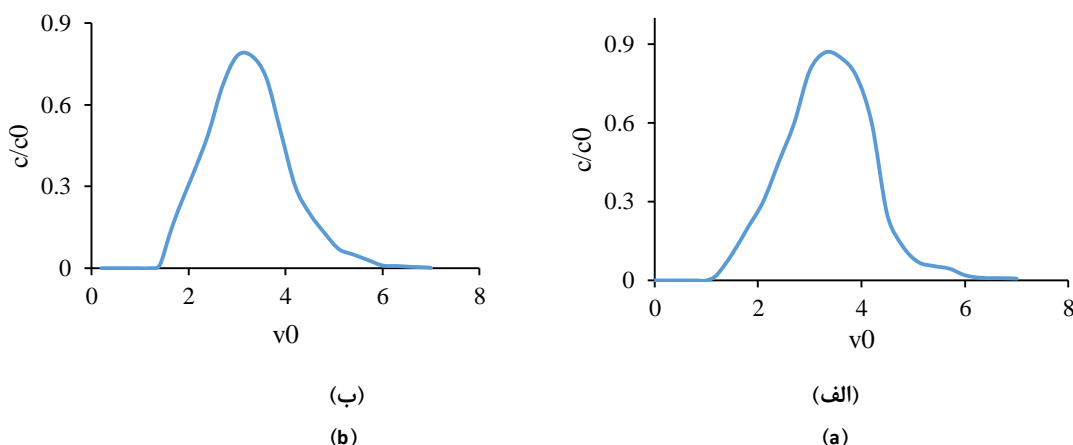
در صورتی که اجزای غالب ساختمان مکعبی، خاکدانه های مکعبی متوسط هستند. در ساختمان مکعبی، غیریکنواختی بیشتر انتقال بروماید، احتمالاً ناشی از



شکل ۳- منحنی رخنه بروماید ساختمان های مکعبی (الف) و دانه ای (ب) دست نخورده
Figure 3. Breakthrough Curve of undisturbed blocky (a) and granular (b) structure

بسیار کم منافذ درشت، حرکت آب بسیار کند بود و جریان ترجیحی صورت نگرفت. ارساهین و همکاران (Ersahin *et al.*, 2002)، بیان کردند که تقارن و عدم ظهور زود هنگام بروماید در منحنی ساختمان فشرده و همچنین جبهه رطوبتی یکنواخت، عدم وقوع جریان ترجیحی در این ساختمان را توجیه می کند. همچنین بهم خوردگی ساختمان خاک و افزایش سطح تماس ذرات خاک با بروماید در خاک دست خورده، باعث کندتر شدن حرکت بروماید در این ساختمان نسبت به ساختمان فشرده شد.

در منحنی رخنه ساختمان دست نخورده فشرده و خاک دست خورده، خروج زودهنگام بروماید دیده نشد و شکل منحنی متقارن بود (شکل ۴). این مسئله، نشان دهنده عدم حضور (وقوع) جریان ترجیحی در این خاک ها بود. خروج بروماید در این دو ستون خاک به ترتیب در حجم های منفذی ۱/۲ و ۱/۴ صورت گرفت و نقطه اوج منحنی رخنه بروماید، به ترتیب در حجم های منفذی ۲/۶ و ۳ ظاهر شد (شکل ۴). رسیدن نقطه اوج منحنی رخنه در حجم منفذی بیشتر، نشان دهنده انتقال آهسته تر املاح در خاک است. در خاک با ساختمان فشرده، به علت چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و تعداد



شکل ۴- منحنی رخنه بروماید در ساختمان فشرده دست نخورده (الف) و خاک دست خورده (ب)
Figure 4. Breakthrough Curve of undisturbed massive (a) and disturbed (b) structure

شاخص‌های کمی جریان ترجیحی

یکی از اهداف مهم این پژوهش، مقایسه بین شاخص‌های جریان ترجیحی در پیش‌بینی وقوع آن است که در ساختمان‌های مختلف بررسی شد. نتایج تجزیه واریانس

اثر ساختمان بر شاخص‌های جریان ترجیحی در جدول ۲ ارائه شده است. اثر ساختمان بر شاخص‌های جریان ترجیحی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار شد (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر ساختمان بر شاخص‌های جریان ترجیحی

Table 2. Variance analysis of structure effect on preferential flow indices

Source of variation	Df	Mean Square	
		μ_1'	S
Structure	3	0.813	1.115
Error	8	0.01	0.004

**P≤0.01

میانگین زمان رخنه بروماید در هر دو خاک دست نخورده مکعبی و دانه‌ای کمتر از ۰/۵ بود (جدول ۳). به عبارت دیگر در هر دو ساختمان خاک، جریان ترجیحی رخ داده است.

شاخص میانگین زمان رخنه (μ_1') مقایسه میانگین شاخص میانگین زمان رخنه در ساختمان‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار عددی ۰/۵ یا کمتر برای μ_1' نشان دهنده وجود جریان ترجیحی می‌باشد (Kamra & Lennartz, 2005).

جدول ۳- مقایسه میانگین شاخص میانگین زمان رخنه در ساختمان‌های مختلف

Table 3. Mean comparison of mean breakthrough time index in different structures

Granular undisturbed	Blocky undisturbed	Massive undisturbed	Disturbed soil
0.39c	0.20d	0.93b	1.30a

The dissimilar letters indicate significant difference and same letters show non-significant difference between various structures (p<0.05 Duncan).

ساختمان و پایداری خاکدانه‌ها و تخریب ساختمان باعث تغییر میانگین زمان رخنه می‌شوند. خاک با ساختمان فشرده از ذرات به هم پیوسته نامنظم با منافذ بسیار ریز تشکیل شده است. به همین دلیل است که زمان رخنه این ساختمان از خاک‌های با ساختمان دیگر بیشتر است. با توجه به این که نقطه اوج منحنی رخنه در ساختمان فشرده و خاک دست‌خورده نسبت به ساختمان‌های دیگر در حجم منفذی بیشتر ظاهر شد، بدیهی است که میانگین زمان رخنه در این دو خاک بیشتر از ساختمان‌های دیگر باشد (شکل ۴).

شاخص چولگی رخنه (S)

شاخص چولگی منحنی رخنه با استفاده از گشتاور دوم و سوم منحنی و با کاربرد (رابطه ۲) به دست آمد. جدول ۴ مقایسه میانگین شاخص چولگی را بین ساختمان‌های مختلف نشان می‌دهد. چولگی (بدون بعد) یکی از شاخص‌های کمی برای توصیف وجود و یا عدم وجود جریان ترجیحی در خاک است که توسط کاستل و

شاخص μ_1' منحنی رخنه بروماید در خاک مکعبی دست‌نخورده ۳۳ درصد کمتر از خاک دانه‌ای دست نخورده بود. این بدان معنی است که پالس مساوی محلول حاوی بروماید، در خاک با ساختمان مکعبی در زمان کمتری به خروجی رسیده است (جدول ۳). با توجه به پایین بودن میزان شاخص μ_1' در خاک مکعبی، می‌توان گفت که وقوع جریان ترجیحی در آن، بیشتر از خاک دانه‌ای است که توسط اشکال منحنی رخنه این دو ساختمان نیز تأیید شده است (شکل ۳).

شاخص μ_1' مربوط به بروماید در خاک دست‌خورده بیشتر از خاک‌های دیگر بود و بیانگر اثر تخریب ساختمان بر زمان منحنی رخنه نیز می‌باشد. به عبارت دیگر، با از بین رفتن مجاری درشت هادی محلول در خاک دست‌خورده، مدت زمان اقامت آنها در خاک افزایش یافته است. شاخص μ_1' در هر دو خاک فشرده و دست‌خورده بیشتر از ۰/۵ بود. یعنی جریان ترجیحی در هیچ کدام از آنها رخ نداده است. به عبارت دیگر، نوع

داده‌ها (Pv) را حول میانگین نشان می‌دهد. گشتاور سوم (μ_3) میزان کشیدگی منحنی رخنه را نشان می‌دهد. مثبت بودن μ_3 بیانگر کشیدگی (Tailing) منحنی رخنه است (Kamra & Lennartz, 2005).

همکاران (Koestel *et al.*, 2011) ارائه شد. محققان یاد شده اعلام کردند که مقدار عددی ۱ یا بیشتر برای S، نشان دهنده وجود جریان ترجیحی می‌باشد. μ_2 (گشتاور دوم)، واریانس منحنی رخنه است و میزان پراکندگی

جدول ۴- مقایسه میانگین شاخص چولگی منحنی رخنه در ساختمان‌های مختلف

Table 4. Mean comparison of breakthrough curve skewness index in different structures

Index	Granular undisturbed	Blocky undisturbed	Massive undisturbed	Disturbed
μ_2	0.86	0.95	0.73	0.65
μ_3	0.94	1.34	0.21	0.11
S	1.17b	1.45a	0.34c	0.21c

The dissimilar letters indicate significant difference and same letters show non-significant difference between various structures ($p < 0.05$ Duncan).

خاک در جدول ۵ آورده شده است. مناطق رنگی بیانگر رفتار بروماید در خاک‌های مورد مطالعه هستند. جدول ۵ نشان می‌دهد در یک حجم معین از ماده ردیاب برلیانت بلو اف سی اف، عمق نفوذ در خاک با ساختمان مکعبی به ترتیب ۲۹، ۶۲ و ۷۰ درصد بیشتر از خاک‌های با ساختمان دانه‌ای، فشرده و خاک دست-خورده بود که نقش منافذ درشت ناشی از ساختمان را در جریان ترجیحی نشان می‌دهد. بعد از خاک‌های با ساختمان مکعبی، عمق نفوذ نیز در خاک‌های با ساختمان دانه‌ای نسبت به خاک‌های با ساختمان فشرده و دست‌خورده به ترتیب ۴۷ و ۵۹ درصد بیشتر بود که تأیید کننده نتایج حاصل از شبیه‌سازی و وقوع جریان ترجیحی در این ساختمان خاک است. این نتیجه با اشکال منحنی رخنه در دو خاک با ساختمان دانه‌ای و مکعبی نیز مطابقت دارد (شکل ۳).

در خاک‌های با ساختمان دانه‌ای، با این که عمق نفوذ از خاک با ساختمان مکعبی کمتر بود، اما درصد مساحت رنگی در این ساختمان ۱۷ درصد نسبت به خاک با ساختمان مکعبی بیشتر بود. کشیدگی بیشتر منحنی رخنه ساختمان دانه‌ای نسبت به ساختمان مکعبی تأیید کننده این افزایش سطح رنگی است (شکل ۳).

براساس جدول ۴، میانگین شاخص S منحنی رخنه بروماید در خاک مکعبی < دانه‌ای < فشرده و دست-خورده بود که به معنی افزایش شدت وقوع جریان ترجیحی در این خاک‌ها است. علت این امر را می‌توان به منافذ درشت بیشتر در خاک مکعبی به دلیل فعالیت زیاد ریشه و توسعه قوی ساختمان نسبت داد. لی و قدرتی (Li & Ghodrati, 1994)، نشان دادند که مجاری مربوط به ریشه‌های پوسیده گیاهان ذرت و یونجه باعث رخنه سریع محلول بروماید و چولگی در منحنی‌های رخنه گردید و بیانگر وقوع جریان ترجیحی در این مجاری بود. مقایسه شاخص S نشان داد که در خاک فشرده و دست‌خورده، به دلیل از بین رفتن منافذ ماکروپوری و افزایش کجی و معوجی، جریان ترجیحی رخ نداده است. کامرا و لنارتز (Kamra & Lennartz, 2005)، اظهار داشتند منحنی‌هایی که حالت نسبتاً متقارن (بدون کشیدگی و یا چولگی) دارند، نشانگر عدم وقوع جریان ترجیحی می‌باشند. در این مطالعه شکل متقارن منحنی رخنه ساختمان فشرده و خاک دست-خورده نیز گواه عدم وقوع جریان ترجیحی بود (شکل ۴).

شاخص کیفی جریان ترجیحی (تجزیه و تحلیل تصاویر رنگی)^۱

تصویر توزیع ماده رنگی در مقطع ناشی از برش طولی و الگوهای جریان خاک‌های مختلف مورد مطالعه در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده است. همچنین درصد مساحت رنگی شده و عمق نفوذ ماده ردیاب رنگی در هر

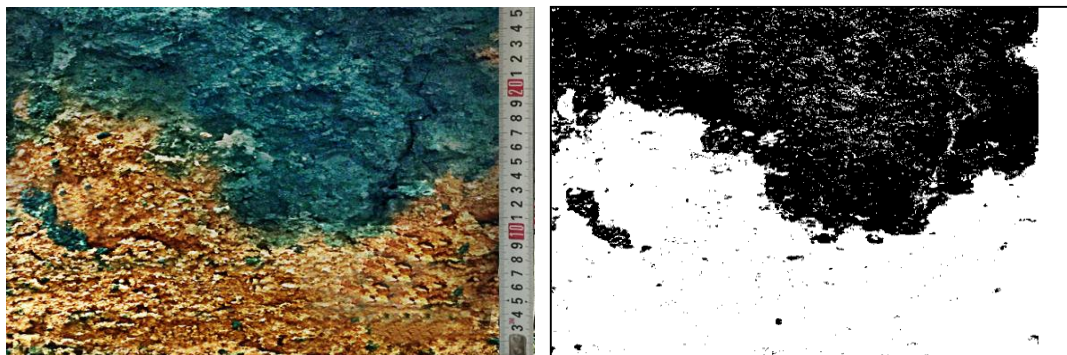
1- Image Processing

جدول ۵- نتایج حاصل از رنگ آمیزی مسیرهای جریان در ستون‌های خاک* توسط ردیاب بریلیانت بلو اف سی اف
Table 5. Results of staining flow paths in soil columns using dye tracer of Brilliant Blue FCF

	Granular undisturbed	Blocky undisturbed	Massive undisturbed	Disturbed
Infiltration Depth (cm)	17	24	9	7
Stained Area (%)	41	34	21	18

رنگی دیده نشد و به صورت زیگزاگ و پراکنده بود. به عبارت دیگر حرکت رنگ به فرم پیستونی نبوده و بیشتر از مجاری درشت که انتقال رنگ را تسهیل کرده‌اند، اتفاق افتاده است. در خاک‌های با ساختمان فشرده به علت عدم وقوع جریان ترجیحی، جبهه ماده رنگی از دو ساختمان دست‌نخورده دیگر منظم‌تر بود (شکل ۷). در ستون دست‌خورده خاک، جبهه ماده ردیاب رنگی بسیار منظم‌تر از خاک‌های با ساختمان دست‌نخورده بود (شکل ۸).

در خاک‌های با ساختمان فشرده و دست‌خورده، کمترین عمق نفوذ و درصد مساحت رنگی بیان‌کننده عدم وقوع جریان ترجیحی در این خاک‌ها است. وو و همکاران (wu *et al.*, 2015)، از ماده ردیاب رنگی به منظور مشاهده مسیرهای جریان ترجیحی استفاده کردند و بیان کردند که بهم‌خوردگی ساختمان خاک باعث از بین رفتن منافذ درشت شده و جریان ترجیحی و خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط علف‌کش‌ها و کودها را کاهش می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، در ستون‌های دست‌نخورده مکعبی و دانه‌ای، جبهه منظم ماده



(ب)

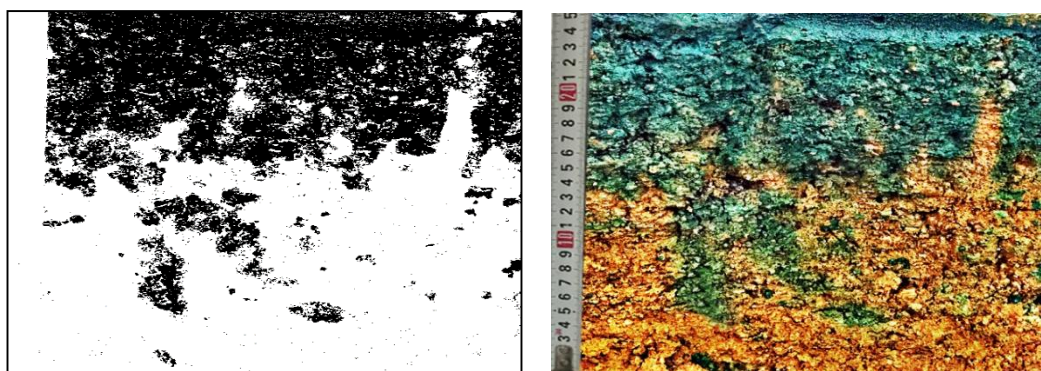
(الف)

(b)

(a)

شکل ۵- تصویر نفوذ (الف) و الگوی جریان (ب) ماده ردیاب رنگی خاک با ساختمان دانه‌ای

Figure 5- Image of infiltration (a) and flow pattern (b) of dye tracer in granular structure



(ب)

(الف)

(b)

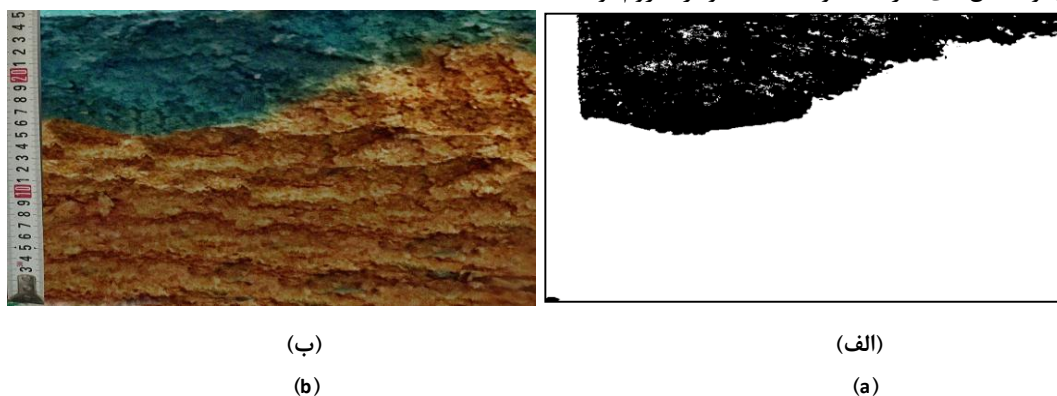
(a)

شکل ۶- تصویر نفوذ (الف) و الگوی جریان (ب) ماده ردیاب رنگی خاک با ساختمان مکعبی

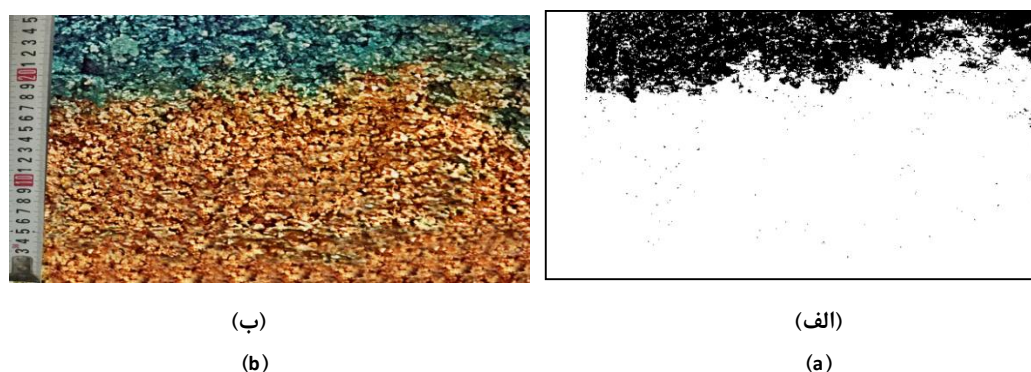
Figure 6. Image of infiltration (a) and flow pattern (b) of dye tracer in blocky structure

همکاران (Ohrstrom *et al.*, 2002)، توسعه ساختمان و منافذ درشت را اصلی ترین عامل ایجاد کننده تغییرپذیری انتقال املاح در این خاکها گزارش کردند. در خاک با ساختمان فشرده، هیچ گونه جریان ترجیحی دیده نشد، ولی الگوی جریان در خاک با ساختمان فشرده (شکل ۷) نسبت به خاک دست خورده (شکل ۸) کمی غیریکنواخت تر بود. می توان نتیجه گرفت الگوی توزیع رنگ در خاک دست خورده، در نتیجه تخریب ساختمان و منافذ درشت به حالت پیستونی نزدیکتر شده و یکنواخت تر است. بر اساس جدول ۵، عمق نفوذ و درصد مساحت رنگی در خاک فشرده نسبت به خاک دست خورده به ترتیب ۲۲ و ۱۴ بیشتر بود. به نظر می رسد وقتی ساختمان خاک بهم می خورد، عمق نفوذ ماده رنگی در مقایسه با درصد سطح رنگ آمیزی شده بیشتر کاهش می یابد. به عبارت دیگر، حرکت جانبی محلول رنگی در خاک دست خورده بیشتر شده است. شکل ۸ نیز این حالت را بهتر نشان می دهد.

مقایسه دو شکل ۵ و ۶ نشان می دهد که الگوی نفوذ ماده رنگی در خاک با ساختمان دانه های متفاوت تر از خاک با ساختمان مکعبی است. در ستون خاک با ساختمان دانه های، حرکت بریلینانت بلو اف سی اف تا عمق ۶ سانتی متری تقریباً به فرم پیستونی بوده و بعد از آن نفوذ و حرکت به پایین از مسیر کانال های درشت و منافذ حاصل از فعالیت ریشه است. بنابراین، می توان گفت احتمالاً خاک از آن عمق به بعد کانال های جریان ترجیحی بیشتری برای حرکت ماده رنگی داشته است. در خاک با ساختمان مکعبی در مقایسه با خاک با ساختمان دانه های، توسعه قوی ساختمان باعث شده که تقریباً از همان ابتدای ستون خاک، حرکت محلول رنگی عمدتاً از مسیر کانال های ریشه صورت بگیرد و لذا عمق نفوذ ماده رنگی تا ۲۳ سانتی متری نیز نفوذ یافته است. در این ساختمان خاک در مقایسه با خاک با ساختمان دانه های، حرکت پیستونی فقط در ۲ سانتی متر اول ستون اتفاق افتاده است و بعد از آن حرکت از منافذ ترجیحی و کانال های درشت بوده است. اوهرستروم و



شکل ۷- تصویر نفوذ (الف) و الگوی جریان (ب) ماده ردیاب رنگی خاک با ساختمان فشرده
Figure 7. Image of infiltration (a) and flow pattern (b) of dye tracer in massive structure



شکل ۸- تصویر نفوذ (الف) و الگوی جریان (ب) ماده ردیاب رنگی خاک دست خورده
Figure 8. Image of infiltration (a) and flow pattern (b) of dye tracer in disturbed soil

خاک و از بین رفتن منافذ درشت در این خاک باعث شد مدت زمان و حجم آب مورد نیاز برای آبشویی کامل محلول بروماید تزریق شده به ستون خاک نسبت به خاک‌های دست‌نخورده بیشتر شود. بنابراین، می‌توان گفت تخریب ساختمان خاک عامل از بین رفتن منافذی است که خروج املاح را از خاک تسهیل می‌کند. شاخص‌های میانگین زمان رخنه (μ_1) و چولگی منحنی رخنه (S) به عنوان شاخص‌های کمی جریان ترجیحی قادر بودند در خاک‌های دست‌نخورده مکعبی و دانه‌ای به خوبی وقوع و در خاک‌های فشرده و دست‌خورده عدم وقوع جریان ترجیحی را نشان دهند. همچنین بررسی تصاویر نفوذ ماده ردیاب رنگی به عنوان شاخص کیفی، الگوی نفوذ و جریان عبوری از منافذ درشت و همچنین منافذ ریز خاک را به خوبی نشان داد. به طور کلی ساختمان خاک تأثیر معنی‌داری بر جریان ترجیحی و حرکت سریع بروماید داشت و نتیجه می‌شود اگر بلافاصله بعد از اضافه کردن مواد شیمیایی کشاورزی مانند کود، آفت‌کش و یا علف‌کش به خاک آبیاری صورت بگیرد، این مواد وارد مسیرهای ترجیحی شده و با حرکت به سمت آبهای زیرزمینی، آلودگی آبهای زیرزمینی را به دنبال خواهند داشت.

مقایسه خاک‌ها در حالت دست‌خورده و دست‌نخورده نشان می‌دهد که عمق نفوذ در خاک دست‌خورده به دلیل از بین رفتن منافذ درشت، کمتر از خاک‌های دست‌نخورده است (جدول ۵). حرکت محلول رنگی در خاک دست‌خورده بیشتر به حالت پیستونی است (شکل ۸)، اما در خاک‌های دست‌نخورده (مکعبی و دانه‌ای) وجود منافذ درشت مانع از حرکت پیستونی شده و مسیرهای ترجیحی در خاک قابل رویت است (اشکال ۵ و ۶). نتیجه کلی که می‌توان گرفت این است که الگوی نفوذ و نیز عمق نفوذ رنگ تابعی وابسته به توسعه ساختمان و بافت خاک است. لارسبو و همکاران (Larsbo et al., 2016)، بیان کردند که در خاک‌های با منافذ ریز خطر انتقال آلاینده‌ها و آبشویی از منافذ درشت کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که منحنی رخنه بروماید در ساختمان‌های مختلف، متفاوت بود. منحنی رخنه خاک-های با ساختمان دانه‌ای و مکعبی غیرمتقارن بود. وقوع جریان ترجیحی از دلایل عدم انطباق منحنی رخنه در این ساختمان‌ها بود. در خاک‌های دست‌خورده، منحنی رخنه کاملاً متقارن بود. بنابراین، بهم‌خوردگی ساختمان

Reference

- Ali G., Macrae M., Walker M., Laing J., and Lobb D. 2018. Preferential flow in vertisolic soils with and without organic amendments. *Agricultural and Environmental Letters*, 3 (1).
- Amiri E, Mahboubi A. A., Mosaddeghi M. R. and Shirani H. 2014. Breakthrough curve of bromide as affected by soil structure in saturated and unsaturated conditions. *Journal of Water and Soil Science*, 18 (68): 111-120. (In Persian)
- Dousset S., Thevenot M., Pot V., Šimunek J. and Andreux F. 2007. Evaluating equilibrium and non-equilibrium transport of bromide and isoproturon in disturbed and undisturbed soil columns. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94 (3-4), 261-276.
- Ersahin S., Papendick R.I., Smith J.L., Keller C.K. and Manoranjan V.S. 2002. Macropore transport of bromide as influenced by soil structure differences. *Geoderma*, 108 (3-4), 207-223.
- Flury M., and Flühler H. 1994. Brilliant blue FCF as a dye tracer for solute transport studies—a toxicological overview. *Journal of Environmental Quality*, 23 (5), 1108-1112.
- Jiang Y., and Shao M.A. 2014. Effects of soil structural properties on saturated hydraulic conductivity under different land-use types. *Soil Research*, 52 (4), 340-348.
- Kamra S.K., and Lennartz B. 2005. Quantitative Indices to characterize the extent of preferential flow in soils. *Environmental Modeling and Software*, 20 (7), 903-915.
- Koestel J.K., Moeyes J., and Jarvis N.J. 2011. Evaluation of nonparametric shape measures for solute breakthrough curves. *Vadose Zone Journal*, 10 (4), 1261-1275.
- Larsbo M., Koestel J., Kätterer T., and Jarvis N. 2016. Preferential transport in macropores is reduced by soil organic carbon. *Vadose Zone Journal*, 15 (9).

- Lee J., Horton R., Noborio K., and Jaynes D.B. 2001. Characterization of preferential flow in undisturbed, structured soil columns using a vertical TDR probe. *Journal of contaminant hydrology*, 51(3-4), 131-144.
- Li Y., and Ghodrati M. 1994. Preferential transport of nitrate through soil columns containing root channels. *Soil Science Society of America Journal*, 58 (3), 653-659.
- Müller K., Deurer M., McLeod M., Young I., Scott J., and Clothier B.E. 2014. Macropore networks affect the filtering function of soils.
- Ohrstrom P., Persson M., Albergel J., Zante P., Nasri S., Berndtsson R., and Olsson J. 2002. Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage. *Hydrological Journal*, 257: 164–173.
- Pales A.R. 2017. Preferential flow systems amended with biogeochemical components: imaging of a two-dimensional study (doctoral dissertation, Clemson University).
- Sheng F., Liu H., Wang K., Zhang R., and Tang Z. 2014. Investigation into preferential flow in natural unsaturated soils with field multiple-tracer infiltration experiments and the active region model. *Journal of hydrology*, 508, 137-146.
- Wu Q., Liu C., Lin W., Zhang M., Wang G., and Zhang F. 2015. Quantifying the preferential flow by dye tracer in the North China plain. *Journal of Earth Science*, 26 (3), 435-444.
- Zhang Y., Zhang M., Niu J., and Zheng H. 2016. The preferential flow of soil: a widespread phenomenon in pedological perspectives. *Eurasian soil science*, 49 (6), 661-672.

Study of Some Quantitative and Qualitative Indices of Preferential Flow in Different Soil Structures

Noshin Ramezani^{1*}, Ahmad Landi², Abdorahman Barzegar³ and Gholam Abbas Sayyad⁴

(Received: April 2019 Accepted: December 2019)

Abstract

The preferential flow is enhanced by the nature of the soil structure and by providing a direct and rapid flow for transferring pollutants, leads to pollution of groundwater. Therefore, the purpose of this study was to investigate and compare some quantitative and qualitative preferential flow indices in different soil structures in Lorestan province. The study was conducted on un distributed soil columns with three different structures namely: (Granular, Blocky, and Massive) and a distributed soil with 3 replicate in a completely randomized design. In order to the plot breakthrough curve in each soil structure, injections of bromide at a concentration of 50 mg/L were carried out using a tension infiltrometer device under tension of 15-millimeter to soil columns. The breakthrough curve of different structures was plotted and accordingly the quantitative parameters of the preferential flow such as the mean time of breakthrough curve (μ_i) and the skewness index of the breakthrough curve (S) were calculated. For the study the paths of preferential flow, the infiltration of the dye tracer and image processing in different soil columns were performed. The results showed that soil structure had a significant effect on preferential flow occurrence in different soils. The comparison of breakthrough curve shape for different structures, showed the occurrence of preferential flow in blocky and granular soils and non-occurrence of this phenomenon in massive and disturbed soils. Also, the index of mean breakthrough time (0.2 and 0.39) and the skewness of breakthrough curve (1.17 and 1.45), in blocky and granular structures respectively confirmed the occurrence of preferential flow in these soils. The results of image processing showed that the infiltration depth of the tracer material in blocky structure was 29, 62 and 70% higher than granular, massive and disturbed structures, which demonstrated the role of type and enhancement of structure on occurrence preferential flow.

Keywords: Dye tracer, Mean breakthrough time, Skewness index

Ramezani N., Landi A., Barzegar A.R. and Sayyad Gh.A. 2020. Study of some quantitative and qualitative indices of preferential flow in different soil structures. *Applied Soil Research*, 8(3): 83-95.

1. PhD in Soil Physics and Conservation Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

2. Professor of Soil Genesis and Classification, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

3. Professor of Soil Physics and Conservation, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

4. Associate Professor of Soil Physics and Conservation, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

* Corresponding Author Email: Ramezani_nooshin@yahoo.com