

## تأثیر لجن پتروشیمی تبریز بر جریان ترجیحی و پارامترهای انتقال بروماید در یک خاک لوم آهکی

شکراله اصغری<sup>1\*</sup>، اسماء ضیال‌الدینی و فریرز عباسی

استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل؛ shasghari@uma.ac.ir

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل؛ ziyaaadinasma@yahoo.com

دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج؛ fariborzabbasi@ymail.com

### چکیده

مسیرهای جریان ترجیحی باعث اتلاف مقادیر قابل توجهی از عناصر غذایی از ناحیه ریشه می‌گردند. اهداف تحقیق حاضر ارزیابی تأثیر لجن پتروشیمی بر جریان ترجیحی و پارامترهای انتقال بروماید در مدل‌های انتقال - انتشار (CDE) و روان ساکن (MIM) در یک خاک لوم آهکی بود. خاک مورد مطالعه از مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی و لجن از مجتمع پتروشیمی تبریز تهیه گردید. مقادیر مصرفی لجن شامل صفر (شاهد)، 25، 50، 75 و 100 تن در هکتار بودند. مقادیر لجن پس از هوا خشک کردن با خاک هوا خشک مخلوط و در لوله‌های پولیکا (ارتفاع 25 و قطر 15 سانتی‌متر) پر گردیدند سپس در گلخانه با دمای  $4 \pm 22^\circ\text{C}$  و در رطوبت 70 تا 80 درصد ظرفیت مزرعه به مدت 6 ماه نگهداری شدند. آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در 3 تکرار اجرا گردید. هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و منحنی‌های رخنه (BTC) بروماید در ستون‌های خاک در انتهای ماه ششم اندازه‌گیری شدند. ضریب انتشارپذیری ( $\lambda$ ) در مدل‌های CDE و MIM، رطوبت ساکن ( $\theta_{im}$ ) و ضریب تبادل بروماید ( $\alpha$ ) در مدل MIM از طریق برازش داده‌های BTC (زمان و غلظت نسبی بروماید) به مدل‌های مذکور با استفاده از نرم افزار HYDRUS-1D برآورد گردیدند. کلیه مقادیر لجن در مقایسه با شاهد به طور معنی‌دار  $K_s$  را به میزان 55 تا 67 درصد کاهش و زمان رخنه بروماید را به میزان 60/3 تا 83/2 درصد افزایش دادند. ضریب انتشارپذیری ( $\lambda$ ) در هر دو مدل CDE و MIM فقط در تیمار 50 تن لجن در هر هکتار به طور معنی‌دار نسبت به شاهد افزایش یافت. مقادیر لجن نتوانستند اثر معنی‌داری بر پارامترهای  $\alpha$  و  $\theta_{im}$  داشته باشند. در مجموع، لجن پتروشیمی باعث کنترل جریان ترجیحی بروماید در یک خاک منتخب از منطقه نیمه خشک گردید.

واژه‌های کلیدی: انتقال املاح، مدل CDE، مدل MIM، لجن پتروشیمی، خاک منطقه نیمه خشک

### مقدمه

خاک، زمان و میزان آلوده شدن آبهای زیرزمینی حائز اهمیت است. یکی از ساز و کارهای انتقال آب و املاح در خاک جریان ترجیحی<sup>2</sup> می‌باشد.

بررسی فرایند انتقال املاح در خاک از نظر تخمین میزان تلفات عناصر غذایی و آبشویی نمک‌ها از ناحیه ریشه گیاه، انتقال آلاینده‌های نفتی و مواد سمی در

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: کد پستی، 5619911367

\* دریافت: آذر 1390 و پذیرش: آبان 1391

<sup>2</sup> Preferential flow

در برخی چاه‌ها غلظت 70/8 میلی‌گرم بر لیتر (7 برابر استاندارد 10 میلی‌گرم بر لیتر) نیز اندازه‌گیری شد. بهره‌گیری از اصلاح‌کننده‌های آلی ارزان قیمت مثل لجن صنعتی از جمله شیوه‌های مدیریتی برای کاهش محدودیت‌های ذکر شده در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. نتایج تحقیق فهد علی و علی عبدالحسین (2002) نشان داد که انکوباسیون خاک با 1/5 درصد ماده نفتی به مدت 0، 1، 2، 4 و 6 ماه در دمای 20 تا 25°C و رطوبت 33 کیلوپاسکال باعث جابجایی شکل منحنی رخنه<sup>1</sup> (BTC) کلراید در مقایسه با تیمار شاهد گردید. میزان جابجایی و کشیدگی BTC به علت تغییر در توزیع اندازه منافذ خاک در تیمار 6 ماه قابل توجه بود. پژوهش نقوی و همکاران (1384) نشان داد که افزودن 60 تن کود گاوی در هر هکتار به یک خاک لوم شنی در مزرعه باعث جابجایی منحنی رطوبتی به سمت بالای شاهد (افزایش سهم منافذ ریز در مقایسه با منافذ درشت) و کاهش معنی‌دار انتقال بروماید به اعماق پایین نسبت به شاهد، 3 ماه پس از شروع آزمایش گردید. اصغری و همکاران (2011) نیز در یک تحقیق گلخانه‌ای گزارش نمودند که استفاده از لجن پتروشیمی تبریز در مقادیر 5 و 10 تن در هکتار به یک خاک لوم شنی اگرچه باعث کاهش ضریب انتشارپذیری<sup>2</sup> ( $\lambda$ ) در مدل‌های انتقال - انتشار<sup>3</sup> (CDE) و روان - ساکن<sup>4</sup> (MIM) طی 6 ماه انکوباسیون گردید ولی تأثیر آن بر رطوبت ساکن<sup>5</sup> ( $\theta_{im}$ ) و ضریب تبادل نمک بین نواحی ساکن و روان<sup>6</sup> ( $\alpha$ ) در خاک به علت بالا بودن ضریب تغییرات این پارامترها نتوانست معنی‌دار گردد.

بررسی منابع قبلی حاکی از کمبود مطالعه در زمینه تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر جریان ترجیحی و پارامترهای انتقال املاح در خاک‌های با کلاس بافتی مختلف بود. تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر مقادیر مختلف لجن فاضلاب مجتمع پتروشیمی تبریز به عنوان یک اصلاح‌کننده ارزان قیمت و سهل‌الوصول بر جریان ترجیحی بروماید (ردیاب) بر مبنای شکل BTC، زمان رخنه و هدایت هیدرولیکی اشباع و نیز پارامترهای انتقال بروماید شامل  $\lambda$  در مدل‌های CDE و MIM و  $\theta_{im}$  و  $\alpha$  در مدل

جریان ترجیحی فرایندی است که در آن آب و املاح در مسیرهای معین از طریق مجاری فرعی بخشی از محیط متخلخل حرکت می‌کند (سیمیونک و همکاران، 2003). به عبارت دیگر جریان ترجیحی، حرکت آب و املاح در منافذ درشت و درز و ترک‌های خاک است. منافذ درشت و درز و ترک‌ها ممکن است در اثر عبور و مرور کرم‌های خاکی، پوسیدگی ریشه گیاهان، انقباض و انبساط خاک طی دوره‌های متناوب خشک و مرطوب شدن ایجاد شوند. جریان ترجیحی سبب حرکت آب و املاح در بخشی از نیمرخ خاک و در نتیجه اختلاط ناقص و توزیع غیر یکنواخت آب و املاح در خاک می‌شود (عباسی، 1386). گزارش‌های زیادی وجود دارد که جریان ترجیحی یکی از مسیرهای اصلی هدررفت عناصر غذایی می‌باشد. به عنوان مثال، وگلر و همکاران (2006) گزارش کردند که در یک آزمایش لایسیمتری، 60 درصد نیترات موجود در لجن فاضلاب مصرفی از طریق آبشویی در یک خاک لوم شنی تلف گردید. نتایج تحقیق پرادو و همکاران (2011) نیز نشان داد که وجود مسیرهای جریان ترجیحی در یک خاک آندوسل، علی‌رغم ظرفیت بالای نگهداری خاک در لایه‌های تحتانی باعث حرکت نیترات در عمق یک متری زیر ناحیه ریشه گردید و خطر آلودگی آب زیرزمینی را تشدید نمود. علاوه بر آن شواهدی موجود است که وجود مسیرهای جریان ترجیحی در خاک باعث انتقال سریع و آسان عوامل بیماری‌زا به آبهای زیر زمینی می‌گردد. به عنوان نمونه، زند سلیمی و همکاران (1385) گزارش نمودند که وجود جریان ترجیحی ناشی از منافذ درشت پیوسته در یک خاک لوم رسی شنی علی‌رغم بالا بودن میزان رس و ماده آلی خاک، باعث پالایش کمتر باکتری *اشرشیاکلی* و حضور زود هنگام (0/1 حجم منفذی) آن در زه‌آب خروجی از ستون‌های خاک آزمایشگاهی در مقایسه با خاک شن لومی گردید.

خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک ایران عموماً به علت داشتن نزولات جوی کمتر و فقر پوشش گیاهی از ماده آلی کمی برخوردار بوده و دارای کیفیت فیزیکی ضعیف هستند (تاجیک، 1383). بنابراین ایجاد درز و ترک‌های ناشی از سله و یا وجود احتمالی رس‌های تورم‌پذیر در این خاک‌ها دور از انتظار نیست (بای بوردی، 1385) که این مسأله منجر به اتلاف عناصر غذایی از ناحیه ریشه و نیز آلودگی آب‌های زیر زمینی خواهد شد. خسروی دهکردی و همکاران (1385)، میانگین غلظت نیتروژن نیتراتی در چاه‌های با عمق متوسط 9 و 7/5 متر در 100 حلقه چاه در حاشیه زاینده رود را به ترتیب 5/28 و 17/63 میلی‌گرم بر لیتر گزارش کردند و

1. Breakthrough curve

2. Dispersivity

3. Convection - dispersion equation

4. Mobile - immobile

5. Immobile water

6. Solute exchange coefficient

MIM در یک خاک لوم آهکی منتخب از منطقه نیمه خشک انجام گرفت.

### مواد و روش‌ها

خاک مورد آزمایش از عمق صفر تا 20 سانتی-متری یک مزرعه بایر در ایستگاه تحقیقاتی بابلان دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی واقع در منطقه نیمه خشک سرد (طول جغرافیایی 20° و 48° عرض جغرافیایی 19° و 38°) برداشته شد. لجن مورد استفاده از فاضلاب مجتمع پتروشیمی تبریز تهیه گردید. برخی خصوصیات مهم خاک و لجن مطابق روش‌های معمول و استاندارد (کلوت، 1986؛ پیچ، 1985) اندازه‌گیری شد (جداول 1 و 2).

تعداد 15 لوله پولیکا (PVC) به ارتفاع 25 و قطر 15 سانتی‌متر استفاده شد. ته لوله‌ها یک ورق حلبی مشبک به همراه یک لایه اسکاج به عنوان فیلتر (مانع حرکت ذرات خاک) تعبیه گردید. مقدار خاک هوا خشک (گذرانده شده از الک 4/75 mm) لازم برای پر کردن هر لوله با پودر لجن هواخشک (گذرانده شده از الک 2 mm) به مقادیر 11/11، 22/22، 33/33 و 44/44 گرم بر کیلو گرم خاک هوا خشک (به ترتیب معادل حدود صفر، 25، 50، 75 و 100 تن در هکتار) در رطوبت 75 درصد ظرفیت مزرعه (FC) مخلوط گردید سپس لوله‌ها تا ارتفاع 20 cm به صورت لایه به لایه و بر اساس جرم مخصوص ظاهری مزرعه ( $1/18 \text{ g/cm}^3$ ) در 3 تکرار پر شدند. لازم به ذکر است که مقدار رطوبت FC به روش وزنی و در مزرعه تعیین گردید (علیزاده، 1378).

انکوباسیون خاک تیمارها در داخل گلخانه در دمای  $40 \pm 22^\circ \text{C}$  و رطوبت 70 تا 80 درصد ظرفیت مزرعه به مدت 6 ماه انجام شد. در طول این مدت، کنترل رطوبت خاک ستون‌ها در دامنه 0/7 تا 0/8 FC به روش وزنی و از طریق آبیاری سطحی صورت گرفت.

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با 5 تیمار مقادیر لجن مصرفی و 3 تکرار اجرا گردید. علت استفاده از طرح بلوک، غیر یکنواختی در تابش نور آفتاب به گلخانه بود.

هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) به روش بار ثابت (کلوت و دیرکسن، 1986) و منحنی‌های رخنه بروماید از طریق آزمایشات جانشینی اختلاط‌پذیر<sup>1</sup> در ستون‌های خاک تعیین گردیدند (اسکگز و همکاران، 2002). برای این منظور، ستون‌ها از قسمت پایین با محلول 0/01 مولار

کلراید کلسیم اشباع شد سپس جریان اشباع ماندگار با بار ثابت یک سانتی‌متر در آنها برقرار گردید. بار ثابت حدود یک سانتی‌متر در بالای ستون خاک از طریق تنظیم دستی محلول خروجی از شیر بطری ماریوت ایجاد گردید. با قطع محلول کلراید کلسیم بلافاصله یک پالس<sup>2</sup> از محلول 0/01 مولار بروماید کلسیم ( $C_0$ ) به مدت 10 دقیقه (حداقل زمان لازم برای رسم منحنی رخنه کامل در ستون‌های خاک به کار رفته در این تحقیق) به ستون‌ها تزریق شد. در ادامه عمل آبشویی با محلول 0/01 مولار کلراید کلسیم با همان بار ثابت یک سانتی‌متر تا انتهای آزمایش ادامه یافت. زه‌آب خروجی از هر ستون با قرار دادن یک قیف فلزی بزرگ در انتهای آن در داخل یک استوانه مدرج 250 ml جمع‌آوری و غلظت بروماید در آن (C) با گذشت زمان (t) با استفاده از یک دستگاه pH متر مجهز به الکتروود انتخابگر بروماید (ساخت شرکت Meterohm سوئیس) اندازه‌گیری شد. در این دستگاه دامنه اندازه‌گیری غلظت بروماید از یک میلی‌مول تا یک مول بر لیتر، دما بین صفر تا  $50^\circ \text{C}$  و زمان تعادل برای قرائت غلظت یک دقیقه بود. دستگاه مذکور با به کارگیری محلول‌های استاندارد بروماید (آدرینو و دونر، 1986) با غلظت‌های 0/01، 0/001 و 0/00001 مول بر لیتر واسنجی و آماده برای قرائت غلظت بروماید در زه‌آب خروجی طی عمل آبشویی گردید. عمل اندازه‌گیری غلظت تا زمان تثبیت غلظت بروماید در زه‌آب خروجی ادامه یافت (اسکگز و همکاران، 2002). منحنی‌های رخنه از ترسیم غلظت نسبی بروماید ( $C/C_0$ ) در مقابل زمان تجمعی (t) و یا تعداد حجم منفذی<sup>3</sup> خاک ( $P_v$ ) حاصل گردیدند. یک حجم منفذی در ستون‌های خاک از رابطه زیر محاسبه گردید (سونن و شواب، 2004).

$$IP_v = \theta_s V_t \quad (1)$$

که در آن،  $IP_v$  یک حجم منفذی خاک ( $\text{cm}^3$ )،  $\theta_s$  رطوبت حجمی اشباع ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) و  $V_t$  حجم ظاهری ستون خاک ( $\text{cm}^3$ ) می‌باشد. تعداد حجم منفذی نیز از تقسیم حجم محلول خروجی در هر زمان تجمعی بر یک حجم منفذی محاسبه گردید. زمان رخنه مشاهده‌ای بروماید ( $t_{b0}$ ) بر حسب دقیقه برای هر تیمار از روی نقطه خیز BTC ( $C/C_0$  و t) تعیین گردید (هورتون و همکاران، 1987).

برآورد پارامترهای انتقال بروماید شامل ضریب انتشارپذیری ( $\lambda$ ) در مدل‌های CDE و MIM و نیز رطوبت ساکن ( $\theta_{im}$ ) و ضریب تبادل نمک ( $\alpha$ ) در مدل

<sup>2</sup> Pulse injection

<sup>3</sup> Pore volume

<sup>1</sup> Miscible displacement experiments

به ویژه در تیمار شاهد طی شش ماه آبیاری‌های مکرر، متلاشی شده و در سطح خاک داخل لوله‌ها ترک‌های عریض و عمیق ایجاد گردید. مشاهدات اصغری (1389) بر روی همین خاک نشان داد در نمونه‌های خاک دست نخورده برداشته شده برای تعیین داده‌های جرم مخصوص ظاهری و منحنی رطوبتی، در حین اشباع کردن نمونه‌ها پدیده تورم رخ داده و خاک داخل استوانه‌های فولادی در تیمار شاهد حدود 5 mm بیرون زده در حالیکه در تیمارهای لجن بکار رفته در آن تحقیق (25 تا 100 تن در هکتار) این پدیده رخ نداد. به نظر می‌رسد یکی از دلایل احتمالی پدیده تورم و چروکیدگی در این خاک وجود رس‌های تورم‌پذیر مثل ورمیکولایت باشد. عدم وقوع پدیده تورم در تیمارهای لجن را شاید بتوان چنین توجیه نمود که لجن از طریق افزایش EC (جدول 2) باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و افزایش هم آوری ذرات خاک گردیده است (بای بوردی، 1385). بر اساس نتایج کسرای و ساعدی (1389) بالا بودن EC لجن پتروشیمی تبریز ناشی از زیاد بودن غلظت عناصر کلسیم و منیزیم می‌باشد که این عناصر از عوامل مؤثر در هم آوری ذرات خاک هستند.

لجن به کار رفته در آزمایش دارای 36 درصد کربن آلی (جدول 2) بود که از خصوصیات بارز آن به شمار می‌رود. اگرچه یکی از محدودیت‌های این لجن صنعتی احتمال آلودگی محیط زیست از نظر وجود برخی عناصر سنگین مثل کادمیم و نیکل به ویژه در مقادیر بالای لجن مصرفی مثل 100 تن در هکتار است ولی با عنایت به pH قلیایی و آهکی بودن خاک (جدول 1) به دلیل رسوب این عناصر در pH‌های بالا احتمال خطر مذکور بعید به نظر می‌رسد (کریمی و همکاران، 2009).

#### اثر لجن بر جریان ترجیحی بروماید

جدول 3 نشان می‌دهد که اثر مقدار لجن مصرفی بر هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و زمان رخنه مشاهده‌ای بروماید ( $t_{b0}$ ) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. با توجه به شکل 1 مشاهده می‌شود که خاک شاهد (صفر تن لجن در هر هکتار) دارای  $K_s$  بالاتری (0/88 سانتی‌متر بر دقیقه) در مقایسه با تیمارهای لجن می‌باشد. مشاهدات آزمایش نشان داد که پس از شش ماه انکوباسیون در اثر آبیاری‌های مکرر و به علت ساختمان ضعیف ناشی از کمی مواد آلی (جدول 1) و نیز وجود احتمالی رس‌های تورم‌پذیر، در ستون‌های خاک شاهد، ترک‌های عریض و عمیق ایجاد شد. لذا به نظر می‌رسد دلیل بالا بودن  $K_s$  تیمار شاهد، حرکت سریع آب و بروماید از این مجاری باشد. استفاده از لجن در مقادیر 25

MIM (عباسی، 1386) از طریق برازش داده‌های BTC ( $t$  و  $C/C_0$ ) به این مدل‌ها در نرم‌افزار HYDRUS-1D (سیمونک و همکاران، 1998) انجام گرفت. این نرم‌افزار قادر به برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح به روش حل معکوس<sup>1</sup> در شرایط جریان یک بعدی است. برای اجرای مدل HYDRUS-1D، پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی وان گنوختن (1980) شامل رطوبت حجمی اشباع ( $\theta_s$ )، رطوبت حجمی باقیمانده ( $\theta_r$ )، عکس مکش ورود هوا در خاک ( $\alpha$ ) و ضریب  $n$  مورد نیاز است که قبلاً برای هر تیمار تعیین شده بودند (اصغری، 1389) و پارامتر  $K_s$  اندازه‌گیری شده در این تحقیق به روش بار ثابت طی آبتشویی ستون‌های خاک برای هر تیمار نیز در مدل معرفی گردید. همچنین شرایط اولیه (قبل از شروع آبتشویی) در ستون‌های خاک برای بروماید غلظت صفر (ناچیز و در حد خطای دستگاه بود) و برای رطوبت خاک، رطوبت حجمی اشباع ( $\theta_s$ ) در نظر گرفته شد. شرایط مرزی ورودی برای جریان آب، بار فشار ثابت 1 cm و برای جریان بروماید، شرط مرزی نوع اول یا دریچلت<sup>2</sup> ( $C_0 = 0.02 \text{ mol/l Br}^{-1}$ ) و شرط مرزی خروجی برای جریان آب، تراوش<sup>3</sup> و برای جریان بروماید شرط مرزی نوع دوم یا نیومن<sup>4</sup> (شیب غلظت برابر با صفر) انتخاب گردید (عباسی، 1386).

به منظور رسیدن به توزیع نرمال، تبدیل لگاریتمی بر روی داده‌های  $K_s$ ،  $\theta_{im}$  و  $\alpha$  قبل از وارد شدن به تجزیه واریانس انجام گرفت ولی داده‌های  $\lambda$  و  $t_{b0}$  به علت داشتن توزیع نرمال، مستقیماً وارد تجزیه واریانس شدند. تجزیه‌های آماری داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در نرم‌افزار MSTATC انجام گرفت و برای رسم اشکال از نرم‌افزار EXCEL استفاده گردید.

#### نتایج و بحث

مطابق جدول 1، خاک مورد آزمایش دارای بافت لوم بوده و میزان آب قابل استفاده (FC-PWP) آن برابر با 11/8 درصد وزنی است. بر اساس نتایج اصغری (1390) پایین بودن میزان ماده آلی در خاک منطقه نیمه خشک مورد مطالعه باعث گردیده که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (روش غربال در آب) کوچک باشد ( $MWD = 0.29$  mm) که بیانگر ضعیف بودن پایداری ساختمان خاک است. مشاهدات تحقیق حاضر نیز نشان داد که خاکدانه‌ها

1. Inverse solution

2. Dirichlet

3. Seepage face

4. Neumann

$t_{bo}$  نسبت به  $t_{bc}$  می‌گردد و هر چه این اختلاف بیشتر باشد بیانگر شدیدتر بودن فرایند جریان ترجیحی در خاک است (جوری و هورتون، 2004). بنابراین، در تیمار شاهد  $t_{bo} = 0.38 t_{bc}$  است در حالی که به طور مثال در تیمار 100 تن لجن در هر هکتار  $t_{bo} = 0.46 t_{bc}$  به دست آمد و این بیانگر حرکت سریع بروماید در تیمار شاهد نسبت به تیمارهای لجن به علت وقوع جریان ترجیحی در درز و ترک‌های خاک است.

مقایسه میانگین‌ها در شکل 2 حاکی از افزایش معنی‌دار زمان رخنه بروماید در تیمارهای لجن در مقایسه با شاهد می‌باشد. به نظر می‌رسد تیمارهای لجن به علت کاهش معنی‌دار  $K_s$  (شکل 1) طبق رابطه 2 باعث افزایش معنی‌دار زمان رخنه بروماید گردیدند و بیشترین افزایش زمان رخنه مربوط به تیمار 100 تن کاربرد لجن در هکتار می‌باشد که اختلاف آن با مقادیر کمتر کاربرد لجن نیز معنی‌دار شد. بر اساس گزارش اصغری و همکاران (2011) از میان چهار اصلاح کننده آلی (لجن پتروشیمی، کود گاوی، پلی آکریل آمید و ورمی کمپوست) فقط تیمارهای پلی آکریل آمید و کود گاوی توانستند در زمان 7 روز پس از مخلوط کردن اصلاح کننده با خاک لوم شنی به طور معنی‌دار از رخنه سریع بروماید نسبت به شاهد جلوگیری کنند. این محققان، عدم تأثیر معنی‌دار لجن پتروشیمی بر زمان رخنه بروماید را به مقادیر مصرفی پایین لجن (5 و 10 تن در هکتار) و نیز درشتی بافت خاک نسبت دادند.

اثر مقدار مصرفی لجن بر شکل منحنی رخنه به عنوان نمونه فقط برای تکرار دوم در شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که نقطه خیز منحنی‌های رخنه بروماید در تیمارهای لجن (25 تا 100 تن در هکتار لجن) در مقایسه با شاهد به علت کاهش  $K_s$  (شکل 1)، دیرتر (با تعداد حجم منفذی بیشتر) ظاهر گردید. همچنین نقطه اوج منحنی رخنه و نیز سطح زیر منحنی در تیمار شاهد نسبت به تیمارهای لجن بالاتر و بیشتر است که بیانگر وقوع جریان ترجیحی و بروماید مصرفی بیشتر و در نتیجه خروج مقادیر زیاد آن از ترک‌های عمیق موجود در خاک شاهد می‌باشد که باعث گردید غلظت نسبی بروماید  $(C/C_0)$  به حدود یک نیز برسد. نقطه اوج منحنی‌های رخنه  $(C/C_0)$  ماکزیمم در تیمارهای کاربرد لجن به مراتب پایین‌تر از شاهد قرار دارد (شکل 4) و این منحنی‌ها شکل نسبتاً متقارن دارند که نشانگر عدم وقوع جریان ترجیحی در آنها می‌باشد (سینگ و کانوار، 1991؛ لی و قدرتی، 1997). به طور کلی وجود منافذ درشت (منافذ بین خاکدانه‌ای) باعث ظهور

تا 100 تن در هکتار به علت افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک (اصغری، 1390) و نیز هم آوری ذرات خاک از تشکیل ترک‌های خیلی عمیق در ستون‌های خاک ممانعت کرده و باعث کاهش معنی‌دار  $K_s$  به ترتیب 55/34 تا 67/72 درصد نسبت به شاهد گردید (شکل 1). اختلاف بین مقادیر مصرفی پایین و بالای لجن از نظر اثر بر  $K_s$  احتمالاً به دلیل پایین بودن میزان ماده آلی در خاک (جدول 1) و یا عدم تأثیر معنی‌دار لجن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (اصغری، 1390) به عنوان یک شاخص خاکدانه‌سازی نتوانست معنی‌دار شود. نتایج قبلی اصغری (1390) بر روی همین خاک، عدم اثر گذاری لجن حتی به مقدار 100 تن در هکتار بر MWD خاکدانه‌ها علی‌رغم افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک، به سخت و درشت بودن گرانوله‌های لجن و عدم تجزیه کافی آنها در طی 6 ماه مطالعه نسبت داده شد. بر اساس گزارش نقوی و همکاران (1384) نیز به کارگیری 60 تن در هکتار کود گاوی در یک خاک درشت بافت از طریق کاهش سهم منافذ درشت باعث کاهش  $K_s$  و کندتر شدن انتقال آب و بروماید در خاک گردید. در حالی که نتایج تحقیق بهره مند و همکاران (1381) نشان داد استفاده از لجن فاضلاب در مقادیر 25 تا 100 تن در هکتار باعث افزایش معنی‌دار  $K_s$  یک خاک ریز بافت گردید. بنابراین، به نظر می‌رسد تأثیر اصلاح کننده‌های آلی بر  $K_s$  تابع نوع بافت خاک، نوع و مقدار مصرفی اصلاح کننده می‌باشد.

شکل 2 نشان می‌دهد که زمان رخنه مشاهده‌ای بروماید ( $t_{bo}$ ) در تیمار شاهد 4/15 دقیقه می‌باشد. این مقدار در مقایسه با زمان رخنه محاسبه‌ای بروماید ( $t_{bc}$ ) (12/82 دقیقه) از قانون داریسی برای همین تیمار به مراتب کوچکتر است. قانون داریسی برای محاسبه زمان رخنه توسط هورتون و همکاران (1987) به صورت رابطه زیر ارائه شده است:

$$t_{bc} = \frac{l\theta_s}{q_s} \quad (2)$$

که در آن،  $t_{bc}$  زمان رخنه محاسبه‌ای بروماید (min)،  $l$  طول ستون خاک (cm)،  $\theta_s$  رطوبت حجمی اشباع خاک ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) و  $q_s$  شدت جریان اشباع (cm/min) که در تحقیق حاضر برابر  $1.05 K_s$  بود.

دلیل اختلاف بین  $t_{bc}$  و  $t_{bo}$  یکسان در نظر گرفتن سرعت حرکت آب و املاح در همه منافذ در یک ستون خاک در قانون داریسی (رابطه 2) می‌باشد ولی واقعیت آن است که به دلیل وجود مسیرهای جریان ترجیحی مثل درز و ترک‌ها، آب و املاح در برخی منافذ خاک نسبت به برخی دیگر سریعتر حرکت کرده و باعث کوچکتر شدن

تیمار شاهد، بالا بودن ارتفاع پالس (نقطه اوج) بروماید در منحنی رخنه شاهد نسبت به تیمارهای لجن (شکل 3) می‌باشد. دلیل بزرگ بودن  $\lambda_{CDE}$  در تیمار 50 تن لجن در هر هکتار نسبت به بقیه تیمارها را نیز می‌توان به پایین بودن ارتفاع پالس و پخشیدگی بیشتر منحنی رخنه این تیمار (شکل 3) نسبت داد. نتایج تحقیق فهد علی و علی عبدالحسین (2002) نیز نشان داد که در اثر به کارگیری 1/5 درصد ماده نفتی در یک خاک گچی پس از 6 ماه انکوباسیون، ضریب انتشار هیدرودینامیکی ( $D_h$ ) نسبت به شاهد افزایش و نسبت جریان روان به انتشار کاهش یافت. تأثیر مقادیر مصرفی لجن بر  $\lambda_{MIM}$  تقریباً مشابه نتیجه تأثیر لجن بر  $\lambda_{CDE}$  بود لذا از آوردن شکل آن صرفنظر شد. وجود رابطه همبستگی (رابطه 4) مثبت و معنی‌دار ( $P < 0.01$ ) بین ضریب انتشارپذیری مدل CDE ( $\lambda_{CDE}$ ) و MIM ( $\lambda_{MIM}$ ) در تیمارها و تکرارهای مختلف ( $n = 15$ ) این موضوع را تأیید نمود:

$$\lambda_{MIM} = 0.762\lambda_{CDE} + 0.371 \quad R^2 = 0.89^{**} \quad (4)$$

با توجه به جدول 3 مشاهده می‌شود که به کارگیری لجن در مقادیر 25 تا 100 تن در هکتار نتوانست تأثیر معنی‌داری بر پارامترهای رطوبت ساکن ( $\theta_{im}$ ) و ضریب تبادل نمک ( $\alpha$ ) در مدل MIM داشته باشد. این پارامترها دارای ضریب تغییرات (CV) ریادی (جدول 3) بودند و تأثیر لجن بر آنها معنی‌دار نشد. در تحقیق حاضر مقادیر  $\theta_{im}$  برای تیمارها و تکرارهای مختلف از 0/000005 تا 0/079  $cm^3/cm^3$  متغیر بود که در مقایسه با داده‌های تحقیق مزرعه‌ای عباسی و همکاران (2003) اندکی کوچکتر است. به نظر می‌رسد تخمین‌های انجام گرفته برای  $\theta_{im}$  توسط مدل MIM احتمالاً به علت ناچیز بودن آن، از دقت کافی برخوردار نبوده است و می‌توان نتیجه گرفت آب ساکن نقش مهمی در جابجایی بروماید نداشته و جریان ترجیحی فرایند اصلی انتقال نمک در این تحقیق بوده است. این در حالی است که بر اساس گزارش فهد علی و علی عبدالحسین (2002) استفاده از 1/5 درصد ماده نفتی در یک خاک گچی از طریق خاکدانه-سازی باعث افزایش  $\theta_{im}$  در طی 6 ماه مطالعه گردید. البته این محققان از نرم افزار CXTFIT برای برازش داده‌های منحنی رخنه کلراید به مدل MIM استفاده کردند. مقادیر ضریب تبادل نمک ( $\alpha$ ) در بین تیمارها و تکرارهای مختلف از 0/0012 تا 0/077  $1/min$  متغیر بود که کمتر از یک تا چندین برابر مقادیر گزارش شده توسط محققان دیگر در شرایط آزمایشگاهی (ارساهین و همکاران، 2002؛ جاکوبسن و همکاران، 1992) و مزرعه‌ای (عباسی و همکاران، 2003) می‌باشد.

سریع املاح و جلو افتادن شکل منحنی رخنه گردیده در حالیکه پخشیدگی از منافذ ریز (منافذ درون خاکدانه‌ای) به منافذ درشت باعث تأخیر در خروج املاح و عقب افتادن یا کشیدگی شکل منحنی رخنه می‌گردد (ارساهین و همکاران، 2002).

#### اثر لجن بر پارامترهای انتقال بروماید در مدل‌های MIM و CDE

برازش داده‌های منحنی رخنه به مدل‌های CDE و MIM دارای دقت نسبتاً خوبی بوده و تغییرات ضریب تبیین ( $R^2$ ) بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده غلظت بروماید از 0/825 تا 0/998 به دست آمد. منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری و برازش شده به مدل‌های CDE و MIM به عنوان نمونه برای تیمارهای شاهد و 100 تن کاربرد لجن در هر هکتار در شکل 4 (A و B) آورده شده است.

مطابق جدول 3، اثر مقدار مصرفی لجن بر ضریب انتشارپذیری در مدل‌های CDE ( $\lambda_{CDE}$ ) و MIM ( $\lambda_{MIM}$ ) در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار شد. مقایسه میانگین‌ها در شکل 5 نشان می‌دهد که  $\lambda_{CDE}$  فقط در تیمار 50 تن لجن در هر هکتار و به میزان 51/8 درصد به طور معنی‌دار نسبت به شاهد افزایش یافت ولی در بقیه تیمارهای کاربرد لجن، اختلاف معنی‌دار بین مقادیر  $\lambda_{CDE}$  نسبت به شاهد مشاهده نشد. بین ضریب انتشارپذیری ( $\lambda$ ) بر حسب (cm)، ضریب انتشار هیدرودینامیکی ( $D_h$ ) بر حسب (cm<sup>2</sup>/min)، رطوبت حجمی اشباع ( $\theta_s$ ) بر حسب (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) و شدت جریان اشباع ( $q_s$ ) بر حسب (cm/min) (در تحقیق حاضر  $q_s = 1.05K_s$  بود) رابطه زیر برقرار است (تورید و همکاران، 2003):

$$\lambda = \frac{D_h \theta_s}{q_s} \quad (3)$$

از رابطه 3 می‌توان استنباط نمود که با ثابت در نظر گرفتن صورت کسر، با کاهش  $K_s$  باید  $\lambda$  افزایش پیدا کند. بنابراین انتظار بر این بود که در تیمارهای لجن به علت کاهش  $K_s$  (شکل 1)،  $\lambda_{CDE}$  نسبت به شاهد به طور معنی‌دار افزایش یابد که این اتفاق فقط در تیمار 50 تن لجن در هر هکتار رخ داد. واقعیت این است که در تحقیق حاضر مقادیر  $\lambda$  به روش حل معکوس برآورد گردیده و ممکن است با مقادیر  $\lambda$  واقعی اندازه‌گیری شده (رابطه 3) مطابقت دقیقی نداشته باشد. براساس نظر جوری و هورتون (2004) هرچه پالس نمک در شکل منحنی رخنه کمتر پخش شود و ارتفاع آن افزایش یابد بیانگر کوچکتر شدن  $D_h$  در یک سرعت ثابت و در نتیجه کاهش  $\lambda$  مطابق رابطه 3 می‌باشد. لذا یکی از دلایل احتمالی کوچک بودن  $\lambda$  در

## نتیجه‌گیری کلی

یافت. بنابراین در شرایط طبیعی مزرعه نیز انتظار می‌رود استفاده از لجن فوق الذکر در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک از طریق کاهش مسیرهای جریان ترجیحی باعث جلوگیری از اتلاف آب و عناصر غذایی مثل نیترات و نیز کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی به آلاینده‌ها گردد. البته جهت اظهار نظر دقیق در این موارد، انجام تحقیقات بعدی به ویژه در شرایط طبیعی مزرعه ضروری به نظر می‌رسد.

استفاده از لجن پتروشیمی تبریز در مقادیر 25 تا 100 تن در هکتار به علت افزایش ماده آلی خاک مانع از تشکیل ترکهای عریض و عمیق در خاک منتخب از منطقه نیمه خشک دارای ساختمان ضعیف گردید. در کلیه تیمارهای کاربرد لجن، زمان رخنه املاح (بروماید) به طور معنی‌دار در مقایسه با شاهد (بدون لجن) افزایش، جریان ترجیحی املاح و در نتیجه مقدار بروماید مصرفی کاهش

جدول 1- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

مقدار	واحد	خصوصیت
1/18	g/cm <sup>3</sup>	جرم مخصوص ظاهری مزرعه
52/4	%	تخلخل کل
لوم	-	کلاس بافت
0/29	mm	میانگین وزنی قطر خاکدانه (روش الک تر)
28	درصد وزنی	رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)
16/2	درصد وزنی	رطوبت معادل مکش 1500 کیلوپاسکال (PWP)
20	%	کربنات کلسیم معادل
8/25	-	pH گل اشباع
0/79	dS/m	EC عصاره 2 به 1 (آب به خاک)
1/24	%	کربن آلی

جدول 2- برخی خصوصیات شیمیایی لجن مورد استفاده

مقدار	واحد	خصوصیت
7/47	-	pH عصاره 2 به 1 (آب به خاک)
1/49	dS/m	EC عصاره 2 به 1 (آب به خاک)
36	%	کربن آلی
5/18	%	نیتروژن کل
8	mg/kg	کادمیم
78/5	mg/kg	نیکل
438	mg/kg	سرب

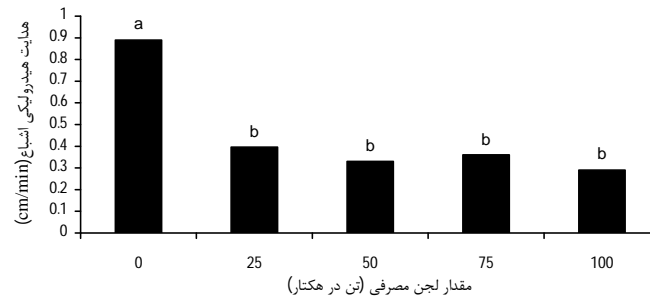
جدول 3- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) پارامترهای اندازه‌گیری شده در تحقیق

منابع تغییر	درجه آزادی	K <sub>s</sub>	t <sub>bo</sub>	λ <sub>CDE</sub>	λ <sub>MIM</sub>	θ <sub>im</sub>	α
بلوک	2	0/018 <sup>ns</sup>	1/054*	0/03 <sup>ns</sup>	0/095 <sup>ns</sup>	6/6*	0/072 <sup>ns</sup>
مقدار لجن مصرفی	4	0/119**	165/48**	1/65*	1/03*	0/716 <sup>ns</sup>	1/062 <sup>ns</sup>
خطا	8	0/008	0/268	0/302	0/217	1/35	0/475
ضریب تغییرات (%)	-	14/05	3/89	27/48	24/37	117/64	218/12

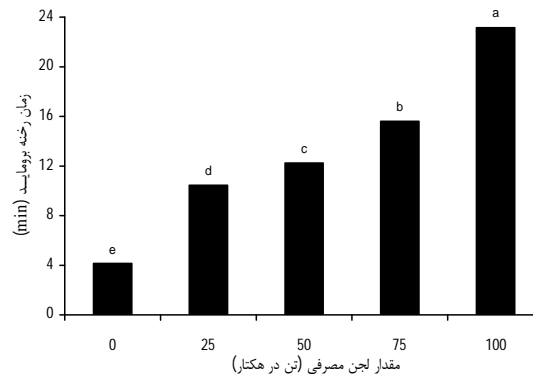
ns: غیر معنی‌دار؛ \* : معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد؛ \*\* : معنی‌دار در سطح احتمال 1 درصد؛ K<sub>s</sub>: هدایت هیدرولیکی

اشباع؛ t<sub>bo</sub>: زمان رخنه مشاهده‌ای بروماید؛ λ<sub>CDE</sub>: ضریب انتشارپذیری مدل CDE؛ λ<sub>MIM</sub>: ضریب انتشارپذیری مدل

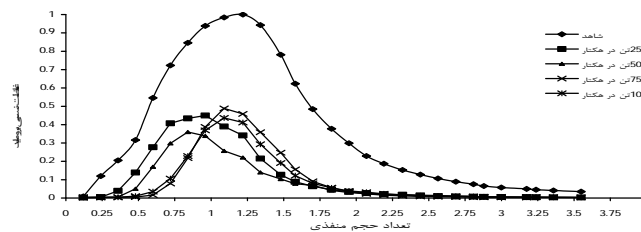
MIM؛ θ<sub>im</sub>: رطوبت ساکن؛ α: ضریب تبادل نمک. ضریب تغییرات (CV) مربوط به داده‌های تبدیل نیافته است.



شکل 1- اثر مقدار لجن مصرفی بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک. حروف غیر مشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد است (آزمون دانکن)

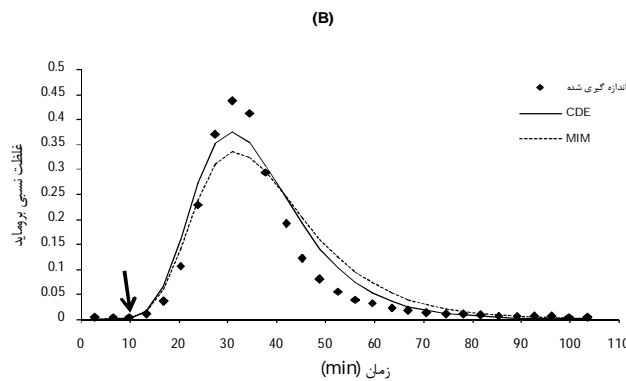
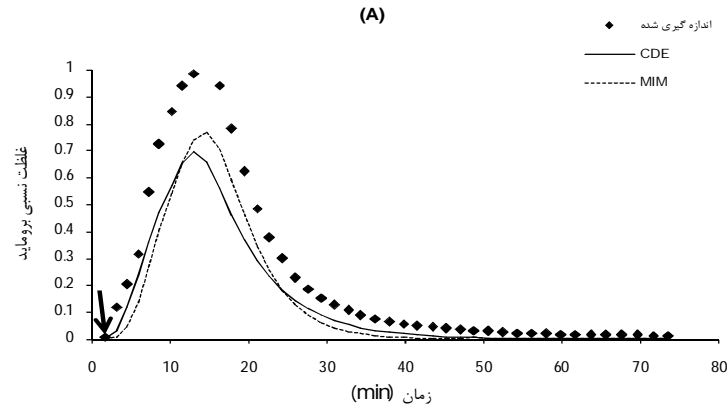


شکل 2- اثر مقدار لجن مصرفی بر زمان رخنه مشاهده‌ای بروماید. حروف غیر مشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد است (آزمون دانکن)

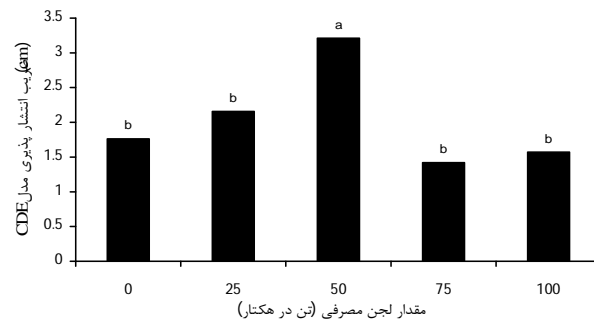


شکل 3- اثر مقدار لجن مصرفی بر شکل منحنی رخنه بروماید





شکل 4- منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری و برازش شده به مدل‌های CDE و MIM برای تیمار شاهد (A) و 100 تن لجن در هر هکتار (B). زمان رخنه مشاهده‌ای نیز از روی نقطه خیز منحنی رخنه اندازه‌گیری شده (فلش‌ها) در دو تیمار قابل تشخیص است



شکل 5- اثر مقدار لجن مصرفی بر ضریب انتشارپذیری مدل CDE. حروف غیر مشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد است (آزمون دانکن)

#### فهرست منابع:

- اصغری، ش. 1389. اثر لجن بیولوژیکی کارخانه پتروشیمی تبریز بر برخی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و هیدرولیکی خاک مزرعه تحقیقاتی بابلان. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی. اردبیل، ایران.

2. اصغری، ش. 1390. اثرات لجن فاضلاب پتروشیمی تبریز بر کربن آلی، شاخص های پایداری خاکدانه و حدود پایایی یک خاک منطقه نیمه خشک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). 25 (3): 530 – 539.
3. بای‌وردی، م. 1385. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه تهران.
4. بهره‌مند، م.ر.، م. افیونی، م.ع. حاج عباسی و ی. رضایی‌نژاد. 1381. اثر لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. 6 (4): 1 – 10.
5. تاجیک، ف. 1383. ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در برخی مناطق ایران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. 8 (1): 125 – 134.
6. عباسی، ف. 1386. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران.
7. علیزاده، ا. 1378. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
8. خسروی دهکردی، ا.، م. افیونی، و ف. موسوی. 1385. بررسی تغییرات غلظت نترات آبهای زیرزمینی حاشیه زاینده رود. مجله محیط شناسی. 39: 33 – 40.
9. زند سلیمی، س.، ع.ا. محبوبی، م.ر. مصدقی، م. رشیدیان و م. فیروزمنش. 1385. بررسی اثر تیمارهای خاک بر منحنی رخنه باکتری اشرشیا کلی آزاد شده از کودهای آلی مختلف. نشریه آب و فاضلاب. 59: 63 – 74.
10. نقوی، ه.، م.ع. حاج عباسی و م. افیونی. 1384. تأثیر کود گاوی بر برخی خصوصیات فیزیکی و ضرایب هیدرولیکی و انتقال بروماید در یک خاک لوم شنی در کرمان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. 9 (3): 103-93.
11. کسرای، ر و س. ساعدی. 1389. تأثیر لجن فاضلاب پتروشیمی تبریز بر رشد گیاه گوجه فرنگی. مجله آب و خاک. 24 (1): 10-20.
12. Abbasi, F., D. Jacques, J. Simunek, J. Feyen, and M. Th. van Genuchten. 2003. Inverse estimation of soil hydraulic and solute transport from transient field experiments: heterogeneous soil. Transaction of the ASAE. 46(4): 1097-1111.
13. Adriano, D. C., and H. E. Doner. 1986. Direct potentiometric method for bromide. p. 451. In: A. L. Page (ed). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Methods. Agron. Monog. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
14. Asghari, Sh., F. Abbasi, and Neyshabouri, M. R. 2011. Effects of soil conditioners on physical quality and bromide transport properties in a sandy loam soil. Biosyst. Eng. 109: 90-97.
15. Ersahin, S., R. I. Papendick, J. L. Smith, C. K. Keller, and V. S. Manoranjan. 2002. Macropore transport of bromide as influenced by soil structure differences. Geoderma. 108: 207-223.
16. Fahad Ali, A., and W. Ali Abdul-Hussein. 2002. Mobile fraction of water and transport parameters in modified structure soil. Transactions 17th Inter. Congress of Soil Sci. Symp. No. 1, P. No. 511. Bangkok, Thailand.
17. Horton, R., M. L. Thompson, and J. F. McBride. 1987. Methods of estimating the travel time of no interacting solute through compacted soil material. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 48-53.
18. Jacobsen, O. H., F. J. Leij, and M. Th. van Genuchten. 1992. Parameter determination for chloride and tritium transport in undisturbed lysimeters during steady flow. Nordic. Hydrol. 23: 89-104.
19. Jury, W., and R. Horton. 2004. Soil Physics. John Wiley and Sons, Inc. USA.
20. Karimi, M., M. Afyuni, Y. Rezainejad, and R. Schulin. 2009. Heavy metal uptake by wheat from a sewage sludge-amended calcareous soil. Nutrition Cycle Agroecosystem. 83:51-61.

21. Klute, A (ed). 1986. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2<sup>nd</sup> edition. Agron. Monog.9. ASA and SSSA, Madison, WI.
22. Klute, A., and C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity of saturated soils (constant head). p. 694. In: A. Klute (ed). Methods of soil analysis. Part1, 2<sup>nd</sup> edition Agron. Monog.9. ASA and SSSA, Madison, WI.
23. Li, Y., and M. Ghodrati. 1997. Preferential transport of solute through soil columns containing constructed macropores. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 1308-1317.
24. Page, A. L. (ed). 1985. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Methods. Agron.Monog.9. ASA and SSSA, Madison, WI.
25. Prado, B., C. Duwig, J. Etchevers, J. P. Gaudet, and M. Vauclin. 2011. Nitrate fate in a Mexican Andosol: Is it affected by preferential flow? Agricultural Water Management. 98: 1441-1450.
26. Simunek, J., N. Jarvis, M. Th. van Genuchten, and A. Gardenas. 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. J. Hydrol. 272: 14-35.
27. Simunek, J., M. Sejna, and M. Th. van Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMC-IPS-70, International Groundwater Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, p.202.
28. Singh, P., and R. Kanwar. 1991. Preferential solute transport through macropores in large undisturbed saturated soil columns. J. Environ. Qual. 20: 295-300.
29. Skaggs, T., G. V. Wilson, P. Shouse, and F. Leij. 2002. Solute transport: experimental methods. p.1381-1392. In: J. H. Dane, and G. C. Topp (ed). Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA, Madison, WI.
30. Sonon, L. S., and A. P. Schwab. 2004. Transport and persistence of Nitrate, Atrazine and Alachlor in large intact soil columns under two levels of moisture content. Soil Sci. 8: 541-553.
31. Torride, N., M. Inoue, and F. J. Leij. 2003. Hydrodynamic dispersion in an unsaturated dune sand. Soil Sci. Soc. Am. J. 67: 703-712.
32. van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
33. Vogeler, I., S. R. Green, T. Mills, and N. E. Clothier. 2006. Modeling nitrate and bromide leaching from sewage sludge. Soil Till. Res. 89(2): 177-184.