



دانشگاه گیلان - دانشکده علوم زمین

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و ششم، شماره سوم، ۱۳۹۸

۲۰۷-۲۲۰

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.14740.2977

## رفتار هیدرولیکی خاک‌های آلوده به تری‌کلرواتن (TCE)

منصور چترنور<sup>۱</sup>، مهدی همایی<sup>۲</sup>، صفورا اسدی کپورچال<sup>۳</sup> و محمد محمودیان شوشتری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، استاد گروه آبیاری و زهکشی،

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، استادیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان،

<sup>۲</sup>استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۱/۲۰

### چکیده

**سابقه و هدف:** نگهداشت و هدایت هیدرولیکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی محیط متخلخل در ارتباط با آلاینده‌ها است. منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی وابسته به ویژگی‌های خاک و سیال هستند. آلاینده‌های کلردار به دلیل نوع ترکیباتی که دارند در هنگام ورود به آب‌های زیرزمینی سبب آلودگی می‌شوند. بنابراین، پیشگیری از ورود این آلاینده‌ها به آب و خاک ضروری است. به منظور بررسی رفتار هیدرولیکی تری‌کلرواتن در خاک، منحنی‌های نگهداشت خاک برای تری‌کلرواتن و آب تعیین شد. تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع در سیستم دو فازی NAPL- هوا و برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع توسط مدل‌های معلم- و ن‌گن‌وختن، معلم- بروکس و کوری و معلم- کوسوگی، در سیستم‌های دو فازی NAPL- هوا هدف دیگر این پژوهش بود.

**مواد و روش‌ها:** در پژوهش حاضر از سیالات تری‌کلرواتن و آب استفاده شد. برای تعیین منحنی‌های نگهداشت آب و تری‌کلرواتن در خاک SiL (سیلتی لوم) از دستگاه ستون آویزان و برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع از روش بار ثابت استفاده شد. پارامترهای منحنی‌های نگهداشت خاک، برای سیالات تری‌کلرواتن و آب بر اساس مدل‌های و ن‌گن‌وختن، بروکس- کوری و کوسوگی در نرم‌افزار RETC تعیین شد. هدایت هیدرولیکی غیراشباع به عنوان تابعی از پتانسیل ماتریک، بر اساس مدل‌های معلم- و ن‌گن‌وختن، معلم- بروکس- کوری و معلم- کوسوگی به دست آمد. همچنین برای مقایسه کمی مدل‌های هیدرولیکی به کار رفته، از آماره‌های خطای حداکثر، ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب تعیین، کارایی مدل و ضریب جرم باقی مانده استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که در یک مقدار معین از فاز مایع، سیال تری‌کلرواتن نسبت به آب، نگهداشت کم‌تر و هدایت هیدرولیکی بیش‌تری را در خاک داشت که با توجه به کشش سطحی و گرانیوی کم‌تر تری‌کلرواتن نسبت به آب، این رفتار قابل انتظار است. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع برای تری‌کلرواتن و آب به ترتیب ۱۳۶/۷۵ و ۹۴/۵ سانتی‌متر

\* مسئول مکاتبه: [mhomae@modares.ac.ir](mailto:mhomae@modares.ac.ir)

بر روز به دست آمد. با مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده نگهداشت سیالات در خاک، مدل ون‌گنوختن بیش‌ترین کارایی (۰/۹۳) و کم‌ترین خطای باقی‌مانده (۰/۰۱۸) را برای آب نسبت به تری‌کلرواتن نشان داد. در دو مدل دیگر نیز کارایی مدل برای سیال آب بیش‌تر است. در مورد سیال تری‌کلرواتن، مدل ون‌گنوختن و بروکس-کوری کارایی نسبتاً مناسبی را از خود نشان دادند. به‌طورکلی، دقت هر سه مدل برای تری‌کلرواتن کم‌تر از آب بود.

**نتیجه‌گیری:** نتایج اعتبارسنجی مدل‌های هیدرولیکی نشان داد که مدل ون‌گنوختن پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل‌های کوسوگی و بروکس-کوری در نگهداشت خاک در سیستم‌های دو فاز آب-هوا و پرکلرواتیلن-هوا ارائه می‌نماید. در نهایت، با توجه به هدایت هیدرولیکی بیش‌تر و نگهداشت کم‌تری که سیال تری‌کلرواتن نسبت به آب دارد، در صورت ورود به خاک حرکت سریع‌تری به سمت آب‌های زیرزمینی خواهد داشت و در صورت ورود به آبخوان سبب آلودگی و تغییر کیفیت آب خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** آب زیرزمینی، آلاینده‌های کلردار، منحنی نگهداشت خاک، هدایت هیدرولیکی خاک اشباع

#### مقدمه

ترکیبات آلاینده‌های مایع آلی نامحلول در آب (NAPLs) از مهم‌ترین آلاینده آب‌های زیرزمینی به‌شمار می‌روند و نسبت به آب خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی دارند. پرکلرواتیلن و تری‌کلرواتیلن از آلاینده‌های سمی و خطرناک این دسته هستند. حرکت آلاینده‌های NAPL متأثر از حجم آلاینده آزاد شده به محیط، سطح نفوذ، مدت زمان رها شدن، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آلاینده، ویژگی‌های مکانیکی محیط متخلخل و وضعیت آب زیرزمینی در محل آلودگی است (۲). هنگامی که NAPL به لایه آبخوان می‌رسد به‌صورت توده‌ای روی آب را می‌پوشاند. اگر محیط متخلخل دارای منفذ باشد، NAPL حرکت خود را ادامه می‌دهد و حرکت آن به شکل و پیوستگی منافذ بستگی دارد (۱).

از ویژگی‌های مهم محیط متخلخل در ارتباط با آلاینده، نگهداشت و هدایت هیدرولیکی است. منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی وابسته به ویژگی‌های خاک و مایع خاک هستند. از جمله ویژگی‌های

فیزیکی مایع خاک می‌توان به چگالی، لزوجت، کشش سطحی و زاویه تماس<sup>۲</sup> اشاره نمود که تحت‌تأثیر حضور NAPLها در خاک قرار می‌گیرند (۱۴). به‌منظور دستیابی به روش‌های پاک‌سازی و حذف NAPLها از محیط‌زیست، نیاز به اطلاعات معتبر و دقیقی در مورد ویژگی‌های هیدرولیکی این آلاینده‌ها در محیط‌زیست می‌باشد (۱۶). روش‌های آزمایشگاهی بسیاری برای تعیین رابطه مکش ماتریک و رطوبت پیشنهاد شده است که اغلب وقت‌گیر، پرهزینه و دارای خطای دستگاهی بالا بوده و بیش‌تر بخشی از دامنه منحنی نگهداشت خاک را پوشش می‌دهند (۲۲). بنابراین مدل‌سازی و شبیه‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است.

از پژوهش‌های رایج در بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی آلاینده‌های کلردار می‌توان به بخر (۲۰۰۱) اشاره کرد که اثرات NAPLها را بر کشش سطحی و زاویه تماس آب خاک بررسی کرده و نتیجه گرفت که در اثر حضور NAPLها در خاک، کشش سطحی مایع

سطحی بین آب و پرکلرواتیلن را کاهش دادند و مشاهده کردند که نیروی شناوری<sup>۴</sup> (ارشمیدس) در جابجایی پرکلرواتیلن نقش مهمی دارد و طی آزمایش‌های ستونی، شدت و مقدار حرکت پرکلرواتیلن را در زمان حرکت سورفاکتانت بررسی نمودند (۱۸). والسر و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی نگهداشت NAPLها در خاک‌های لایه‌ای پرداختند و نتیجه گرفتند که لایه‌های فشرده و ریزبافت در پروفیل خاک، NAPLها را با نیروی بیش‌تری نگهداری می‌کنند که سبب افزایش مقدار NAPL باقی‌مانده (RNAPL) در خاک می‌شود و در نهایت، حضور این لایه‌ها در پروفیل خاک، سبب کند شدن روند پالایش آلاینده‌های هیدروکربنی از خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود (۲۳). ون‌گل و روی (۲۰۰۲) از روابط فشار-اشباع (S-P) برای تعیین مقدار اشباع باقی‌مانده NAPLها و به‌دست آوردن مدلی مناسب برای پیش‌بینی رفتار آنها در محیط‌های متخلخل استفاده کردند. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که در هنگامی که کل آلاینده محیط متخلخل، شامل NAPL باقی‌مانده و محصور شده باشد و سیستم محیط متخلخل غیراشباع باشد، به‌علت اشباع نبودن محیط و صفر بودن درجه اشباع، نفوذپذیری نسبی NAPL به سمت صفر میل خواهد کرد (۲۰).

لنهارد و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از نوعی مدل ساختاری (IP) رابطه بین نفوذپذیری سیال و همچنین روابط فشار-اشباع (SP) سیالات را در سیستم‌های سه‌فازی هوا-NAPL-آب بررسی کردند. این پژوهشگران مدل ساختاری (IP) را به‌منظور پیش‌بینی جریان سیالات با مدل پسماند K-S-P ترکیب کردند و مشاهده کردند که مدل‌های مورد استفاده برای بررسی روابط فشار-اشباع (SP) در نگهداشت آب، برای بررسی رفتار NAPL باقی‌مانده نیز قابل‌استفاده

خاک کاهش و زاویه تماس محلول خاک و ذرات جامد افزایش می‌یابد (۳). پارکر و لنهارد (۱۹۸۷)، مدل‌های ون‌گنوختن و معلم-ون‌گنوختن را برای سیستم سه‌فازی هوا-آب-NAPL و سیستم دوفازی NAPL-هوا در یک خاک شنی اصلاح کردند. با استفاده از فرضیات لورت (۱۹۴۱) از ماده p-Cymene استفاده کردند. این پژوهشگران فرض کردند که قابلیت خیس‌کنندگی آب بیش‌تر از NAPL و NAPL بیش‌تر از هوا است. افزون بر این، اثر افت و خیز سفره آب زیرزمینی، پسماند و محصور شدن NAPL و هوا<sup>۱</sup> بر چگونگی توزیع NAPL در مجاور سفره آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند (۱۷). لنهارد (۱۹۹۲) رفتار پسماند<sup>۲</sup> سالترو<sup>۳</sup> را در یک سیستم متخلخل سه‌فازی اندازه‌گیری و با مدلی لگاریتمی، رفتار نگهداشت سیالات با خیسیدگی کم‌تر را با استفاده از سیالات با خیسیدگی بیش‌تر به‌دست آورد. وی مشاهده کرد که بین داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و داده‌های خروجی مدل ارتباطی معنی‌دار وجود دارد (۱۰). دن و همکاران (۱۹۹۴) روشی را برای تعیین منحنی نگهداشت در دو حالت زهکشی سیالات از خاک و اشباع نمودن آنها در سیستم‌های دوفازی ارائه کردند. آزمایش‌ها در سیستم‌های دوفازی تری‌کلرواتن-هوا و تری‌کلرواتن-آب در خاک‌های شنی و لوم رسی شنی انجام گرفت. نتایج نشان داد که مقدار سیالات در خاک با وارد شدن مکش کاهش یافته و از حالت اشباع به مقدار باقی‌مانده رسید، در مقابل فشار مویینگی سیالات روند افزایشی نشان داد (۶). پنل و همکاران (۱۹۹۶) برای زهکشی پرکلرواتیلن از خاک، سورفاکتانت را مورد استفاده قرار دادند. این پژوهشگران در ابتدای آزمایش جهت تسریع در خروج آلاینده از خاک، کشش

- 1- Air and NAPL entrapping
- 2- Histories
- 3- Soltrol

تعیین پارامترهای مدل‌های منحنی نگهداشت بروکس-کوری، ون‌گنوختن و کوسوگی، در سیستم دوفازی NAPL- هوا و آب- هوا برای سیالات تری‌کلرواتن و آب است. تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع در سیستم دوفازی NAPL- هوا و برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع توسط مدل‌های معلم- ون‌گنوختن، معلم- بروکس و کوری و معلم- کوسوگی، در سیستم‌های دوفازی NAPL- هوا هدف دیگر این پژوهش بود.

**تئوری پژوهش:** به‌منظور بررسی رفتار هیدرولیکی آلاینده‌های هیدروکربنی در محیط متخلخل خاک پژوهش‌هایی چند توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعات بروکس و کوری (۱۹۶۴) اشاره کرد. این دو پژوهشگر برای توصیف منحنی نگهداشت آلاینده سالتروال مدلی پارامتریک به‌منظور شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی این آلاینده در مکش‌های مختلف ارائه کرده‌اند که می‌توان آن را به‌صورت زیر نوشت (۴):

$$S_e = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = (\alpha h)^{-\lambda} \quad (1)$$

که در آن،  $S_e$  اشباع مؤثر،  $\alpha$  عکس مکش در نقطه ورود هوا به خاک ( $\text{cm}^{-1}$ )،  $h$  پتانسیل ماتریک ( $\text{cm}$ )،  $\lambda$  شاخص توزیع اندازه منافذ خاک،  $\theta$  رطوبت حجمی خاک،  $\theta_s$  رطوبت اشباع خاک ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) و  $\theta_r$  رطوبت باقی‌مانده خاک ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) است.

ون‌گنوختن (۱۹۸۰)، برای نگهداشت آب در خاک معادله جامع‌تری را به‌صورت رابطه ۲ عنوان کرد (۲۱).

$$S_e = (1 + (\alpha h)^n)^{-m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

که در آن،  $n$  و  $m$  پارامترهای شکل منحنی نگهداشت،  $\alpha$  پارامتر عکس مکش در نقطه ورود هوا به خاک و نقطه عطف منحنی و  $S_e$  درجه اشباع مؤثر است.

است. در نهایت با مقایسه‌ای که بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده برای NAPL باقی‌مانده انجام دادند دقت مناسبی را در سطح اطمینان ۹۵٪ به‌دست آوردند (۱۱). کشاورزی و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی جریان LNAPL در سیستم‌های دوفازی و سه‌فازی با استفاده از منحنی نگهداشت پرداختند و مشاهده کردند که در مدل‌های شبیه‌ساز، در شرایط دوفازی، محاسبه میزان NAPL باقی‌مانده (RNAPL) به‌عنوان یک فاکتور تأثیرگذار، ضروری است (۸). نوری و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی اثر نفت سفید بر ویژگی‌های هیدرولیکی منحنی نگهداشت و تابع هدایت هیدرولیکی پرداختند و از طریق سه مدل ون‌گنوختن، بروکس-کوری و کمپل رفتار این آلاینده را در محیط متخلخل پیش‌بینی کردند. در پایان نتیجه گرفتند که نفت سفید نگهداشت کم‌تر و همچنین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع بیش‌تری در محیط متخلخل دارد. مدل بروکس-کوری و کمپل نسبت به مدل ون‌گنوختن کارایی کم‌تری برای پیش‌بینی رفتار دو سیال از خود نشان داد. توصیف، مدل‌سازی و درک رفتار آلاینده‌ها در محیط‌های متخلخل، نیاز به اطلاعات دقیقی در مورد رفتار این ترکیبات در خاک دارد. در پژوهشی که توسط چترنور و همکاران (۲۰۱۶) انجام شد رفتار هیدرولیکی پرکلرواتیلن در سیستم دوفازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در یک مقدار معین فاز مایع، آب نسبت به پرکلرواتیلن نگهداشت بیش‌تری داشته و هدایت اشباع و غیراشباع محیط متخلخل برای پرکلرواتیلن بیش‌تر از آب بوده است (۵). ترکیبات کلردار مانند تری‌کلرواتیلن از مضرترین آلاینده‌های محیط‌زیست خاک و آب هستند و بررسی رفتار آن‌ها جهت جلوگیری از ورود آن‌ها به محیط‌زیست و رفع آلودگی محیط آلوده لازم و ضروری است. بنابراین هدف از پژوهش حاضر،

$$K_r = S_e^{(2.5 + \frac{2}{\lambda})} \quad (6)$$

مدل معلم - کوسوگی که با ترکیب مدل معلم (۱۹۷۸) با مدل کوسوگی (۱۹۹۶) به دست آمده است، به شرح زیر است:

$$(S_e) = \begin{cases} K_s S_e^l \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln(h/a)}{\sqrt{2n}} + \frac{n}{\sqrt{2}} \right) \right\}^2 & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

پارامترهای مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس - کوری و کوسوگی با استفاده از نرم‌افزار RETC و به روش حل معکوس به دست آمد.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از سیالات تری‌کلرواتن و آب استفاده شد.

**ویژگی‌های آلاینده:** تری‌کلرواتن که غالباً تری‌کلرواتن<sup>۱</sup> نامیده می‌شود نوعی ترکیب شیمیایی و از انواع ترکیبات آلی فرار با نام اختصاری TCE و فرمول شیمیایی  $C_2Cl_3H$  است. این آلاینده به صورت یک اتیلن است که در آن سه هیدروژن با سه اتم کلر جانشین شده است. در حالت کلی سیالی روغنی و بی‌رنگ است که حلالی مناسب برای مواد آلی تقریباً انحلال‌ناپذیر در آب به شمار می‌رود. تری‌کلرواتیلن دارای ساختاری با مولکول‌های کوچک است و با وجود بالابودن نسبت کربن به هیدروژن، انحلال‌پذیری متوسطی در آب دارد. ولی به دلیل چگالی بیشتر نسبت به آب به اعماق پایین‌تر سفره‌های آب زیرزمینی نفوذ کرده و می‌تواند به آسانی در درون ذره‌های آلی معلق موجود در آب یا رسوبات جذب شود. تری‌کلرواتن ماده‌ای نسبتاً غیرفرار است و در

کوسوگی (۱۹۹۶) با فرض توزیع اندازه ذرات به عنوان یک متغیر تصادفی لوگ نرمال، مدلی دوپارامتری را برای منحنی نگهداشت خاک به دست آورد. این دو پارامتر تحت عنوان میانگین، واریانس توزیع اندازه ذرات بودند. مدل کوسوگی به صورت رابطه ۳ است (۹).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln(h/a)}{\sqrt{2n}} \right) & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

که در آن،  $\operatorname{erfc}$  تابع متمم خطا،  $\alpha$  عکس مکش در نقطه ورود هوا به خاک ( $\text{cm}^{-1}$ ) و  $n$  انحراف استاندارد توزیع فشار کاپیلاری در منافذ تغییر یافته (-) است. مدل سری‌های موازی توسط معلم (۱۹۷۸) که در آن فرض قطع و اتصال مجدد (Cut and rejoining theory) در مورد منافذ خاک وجود دارد به صورت زیر است (۱۳):

$$K_r = S_e^{0.5} \left[ \int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)} / \int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)} \right]^2 \quad (4)$$

که در آن،  $K_r$  هدایت هیدرولیکی نسبی (غیراشباع) در محیط متخلخل است.

ون‌گنوختن با ادغام مدل معلم (۱۹۷۸) با مدل خود در مورد منحنی نگهداشت (رابطه ۲) مدلی را تحت عنوان معلم - ون‌گنوختن به صورت زیر بیان کرد:

$$K_r = S_e^{0.5} \left\{ 1 - \left[ 1 - S_e^m \right]^m \right\}^2 \quad (5)$$

که در آن،  $K_r$  هدایت هیدرولیکی نسبی (غیراشباع) در محیط متخلخل است

از ترکیب مدل ون‌گنوختن با مدل بروکس - کوری مدلی تحت عنوان معلم - بروکس - کوری به دست آمد.

دوفازی تشکیل می‌دهد و آب در لایه بالایی قرار می‌گیرد. از تری‌کلرواتن به‌عنوان یک حلال صنعتی، در خشکشویی، پاک‌کننده رنگ و به‌عنوان ضدعفونی‌کننده نیز استفاده می‌شود. این ماده به هنگام استفاده، از راه‌های تبخیر و همچنین از طریق نشت از مخازن، به محیط‌زیست پراکنده شده و در منابع آبی وارد می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی سیالات فوق در جدول ۱ آمده است.

هوای گرم هم به حالت مایع باقی می‌ماند. معمولاً ۱/۱ گرم آن در یک لیتر آب حل می‌شود. تری‌کلرواتن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد دارای فشار بخاری معادل ۷۴ میلی‌متر جیوه بوده و جرم مولکولی و چگالی آن به ترتیب  $131/40 \text{ g mol}^{-1}$  و  $1/465 \text{ gr ml}^{-1}$  می‌باشد. این ترکیب به‌صورت سیالی روغنی و بی‌رنگ بوده و نقطه ذوب و جوش آن به ترتیب  $87/1$  و  $86/7$  درجه سانتی‌گراد است. تری‌کلرواتن با آب، یک سیستم

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی سیالات.

Table 1. Some physical properties of fluids.

کشش سطحی ( $\sigma$ ) ( $\text{dyne cm}^{-1}$ ) Surface tension ( $\text{dyne cm}^{-1}$ )	گرانروی $20^\circ \text{C}$ (cSt)* Viscosity	چگالی ( $\text{g cm}^{-3}$ ) Density	سیال Fluid
26.4	0.95	1.465	تری‌کلرواتن Trichloroethylene
72.2	1	1	آب Water

\* سانتی‌استوک

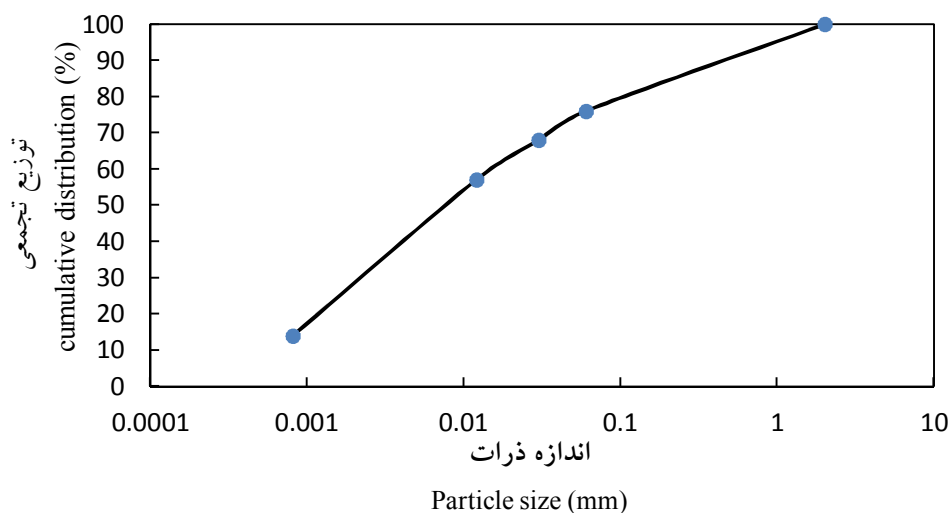
به‌دست آمد. برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع از روش بار پایا یا ثابت<sup>۲</sup> استفاده شد. مقدار مشخصی از خاک مورد مطالعه در درون استوانه با ابعاد مشخص ریخته شد، عمل فشرده‌سازی خاک درون استوانه به‌منظور اعمال جرم ویژه ظاهری انجام شد. پس از برقراری جریان تحت فشار بار ثابت، دبی سیال عبوری از خاک در مدت زمان مشخص به‌دست آمد. در نهایت مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع نمونه به‌دست آمد (۱۵). شکل ۱ توزیع اندازه ذرات خاک SiL را نشان می‌دهد.

خاک مورد مطالعه در این پژوهش SiL (سیلتی لوم) است که برخی ویژگی‌های خاک مورد آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است. در خاک SiL (سیلتی لوم) برای رسم منحنی‌های نگهداشت آب و تری‌کلرواتن از دستگاه ستون آویزان<sup>۱</sup> استفاده شد. با تنظیم ارتفاع سطح مایع خیس‌کننده در شاخه آزاد دستگاه از نمونه خاک (h)، مکش موردنظر بر نمونه‌های خاک اعمال شد. فرآیند اعمال مکش تا ۲۷۰ سانتی‌متر آب ادامه یافت. در هر مرحله از اعمال مکش، مقدار سیال خارج شده از نمونه خاک در یک استوانه مدرج جمع‌آوری گردید. مقدار پتانسیل ماتریک مایع خاک نیز با محاسبه اختلاف سطح مایع خیس‌کننده در شاخه آزاد و نمونه‌های خاک (h)

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش.

Table 2. Some physical properties of studied soil.

انحراف معیار هندسی $\sigma_g$	میانگین هندسی قطر ذرات خاک dg (mm)	جرم ویژه حقیقی $\rho_s$ (g.cm <sup>-3</sup> )	جرم ویژه ظاهری $\rho_b$ (g.cm <sup>-3</sup> )	تخلخل حجمی (%) Volumetric porosity (%)	رس (%) Clay (%)	سیلت (%) Silt (%)	شن (%) Sand (%)	بافت خاک Soil texture
8.538	0.066	2.49	1.22	0.47	9.0	57.5	33.5	SiL



شکل ۱- منحنی توزیع اندازه ذرات خاک SiL.

Figure 1. Particle size distribution curve of SiL soil.

$$a = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i \quad (10)$$

$$b^2 = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln^2 M_i - a^2 \quad (11)$$

که در آن‌ها،  $M_i$  میانگین حسابی دو محدوده متوالی اندازه ذرات است.

برای مقایسه کمی مدل‌های هیدرولیکی به کار رفته، از آماره‌های خطای حداکثر<sup>۱</sup>، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup>، ضریب تعیین<sup>۳</sup>، کارایی مدل<sup>۴</sup> و ضریب جرم باقی‌مانده<sup>۵</sup> استفاده شد. تفسیر ریاضی شاخص‌های آماری بالا به صورت رابطه ۱۲ تا ۱۶ است (۷).

در این پژوهش جرم ویژه ظاهری به روش کلوخه، جرم ویژه حقیقی محیط‌های متخلخل به روش پیکنومتر و فراوانی نسبی اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری تعیین گردید. همچنین پارامترهای فیزیکی میانگین هندسی قطر ذرات خاک (dg) و انحراف معیار هندسی اندازه ذرات خاک ( $\sigma_g$ ) با استفاده از روش شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) به دست آمد که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$d_g = \exp a \quad (8)$$

$$\sigma_g = \exp b \quad (9)$$

- 1- Maximum Error
- 2- Root Means Square Error
- 3- Determination Coefficient
- 4- Modeling Efficiency
- 5- Coefficient of Residual Mass

نگهداشت خاک SiL بر مبنای مدل‌های ون‌گنوختن (۱۹۸۰)، بروکس- کوری (۱۹۶۴) و کوسوگی (۱۹۹۶) برای سیالات آب و تری‌کلرواتن به صورت نیمه لگاریتمی در شکل ۲ بیان شده است.

جدول ۳ پارامترهای مدل‌های نگهداشت و هدایت هیدرولیکی خاک SiL را بر اساس مدل‌های ون‌گنوختن (۱۹۸۰)، بروکس- کوری (۱۹۶۴) و کوسوگی (۱۹۹۶) نشان می‌دهد. پارامترهای پتانسیل ورود هوا شامل  $\alpha$  در مدل ون‌گنوختن،  $\alpha$  در مدل بروکس- کوری و  $\alpha$  در مدل کوسوگی است که مقادیر این پارامترها در هر سه مدل برای آب نسبت به تری‌کلرواتن کم‌تر است و به صورت تری‌کلرواتن < آب است. پارامترهای دامنه توزیع خلل و فرج  $(\lambda, n)$  و  $(\sigma)$  نیز در هر سه مدل برای تری‌کلرواتن از آب بیش‌تر است و سبب می‌شود که شیب منحنی نگهداشت تری‌کلرواتن در هر سه مدل از شیب منحنی نگهداشت آب بیش‌تر باشد. با توجه به جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای توزیع تخلخل خاک کمتر از پارامترهای نقطه مکش ورود هوا تغییر می‌کنند. در این پژوهش مقدار پارامتر  $l$  (اتصال مجاری) در مدل معلم- ون‌گنوختن مقداری ثابت و برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

$$ME = \max|P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (12)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

که در آن‌ها،  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $O_i$  مقادیر مشاهداتی،  $\bar{O}$  میانگین مشاهدات و  $n$  تعداد داده‌ها است.

### نتایج و بحث

**منحنی نگهداشت:** پارامترهای منحنی نگهداشت سیالات در محیط متخلخل با استفاده از نرم‌افزار RETC با روش حل معکوس به دست آمد. در این نرم‌افزار با استفاده از مقادیر خروجی سیالات از محیط متخلخل، پارامترهای مدل تعیین گردید و با جایگذاری مقادیر این پارامتر در معادلات منحنی نگهداشت ون‌گنوختن، بروکس- کوری و کوسوگی، منحنی نگهداشت سیالات به دست آمد. برآورد منحنی

جدول ۳- پارامترهای مدل‌های منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی خاک SiL.

Table 3. Parameters of the retention curve and hydraulic conductivity of SiL soil.

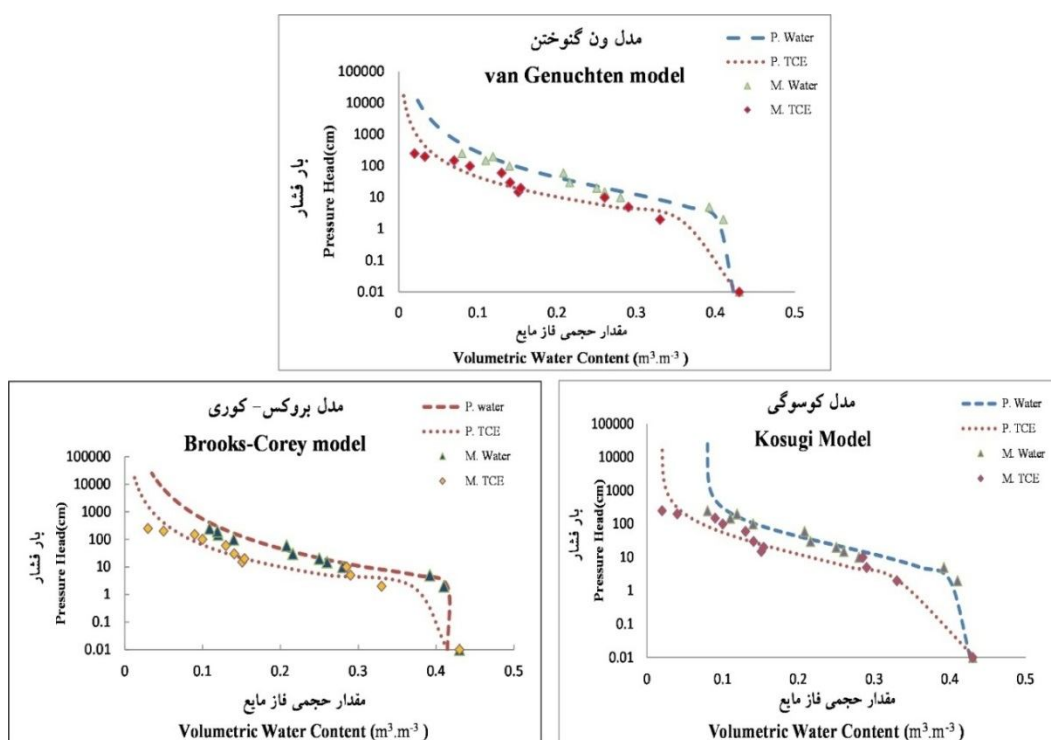
مدل Model												سیال
VG-M <sup>۱</sup> و VG <sup>۲</sup>			M-BC <sup>۳</sup> و BC <sup>۴</sup>				M-K <sup>۵</sup>		پارامترهای مشترک Common parameters			
n	M	$\alpha^1$	$\theta_r$	$\ell^6$	$\alpha^7$	$\lambda$	$\theta_r$	$\alpha^8$	$\Sigma$	$\theta_s$	$K_s$ (cm.day <sup>-1</sup> )	
1.44	0.305	0.243	0.001	0.5	0.509	0.237	0.049	0.37	2.35	0.46	136.75	تری‌کلرواتن Trichloroethylene
1.28	0.318	0.0302	0.001	0.5	0.109	0.176	0.001	0.039	2.15	0.46	94.5	آب Water

۱. مدل معلم- ون‌گنوختن، ۲. مدل ون‌گنوختن، ۳. مدل معلم- بروکس- کوری، ۴. مدل بروکس- کوری، ۵. مدل کوسوگی، ۶.  $\alpha$  در مدل ون‌گنوختن، ۷.  $\alpha$  در مدل بروکس- کوری، ۸.  $\alpha$  در مدل کوسوگی و ۹. پارامتر  $l$  معلم.



مایع ( $\sigma$ ) کاهش و چگالی مایع ( $\rho$ ) و زاویه تماس ( $\alpha$ ) افزایش یابد، توانایی نگهداشت خاک برای مایع کاهش می‌یابد. از طرف دیگر بر اساس معادله نیوتن ( $\tau = \eta \frac{dv}{dr}$ ) هرچه گرانیوی دینامیکی سیال افزایش یابد، مقاومت و اصطکاک سیال در برابر حرکت افزایش می‌یابد (۵). بنابراین با توجه به این‌که آب نسبت به سیال تری‌کلرواتن دارای کشش سطحی و گرانیوی بیشتر است نگهداشت بیشتر نیز در خاک خواهد داشت.

با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که در یک مقدار معین از فاز مایع حجمی، مقدار مکش کمتری برای زهکشی تری‌کلرواتن نسبت به آب مورد نیاز است. دلیل آن را می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی سیالات مثل کشش سطحی ( $\sigma$ )، زاویه تماس ( $\alpha$ )، چگالی ( $\rho$ ) و گرانیوی سیالات که بر روی نگهداشت آن‌ها در خاک اثر دارند، نسبت داد. برآیند این ویژگی‌های سیالات بر روی منحنی نگهداشت خاک اثر می‌گذارد. بر اساس معادله لاپلاس:  $h = \frac{2\sigma \cos\alpha}{\rho g r}$  در یک مقدار مشخص مایع، هرچه کشش سطحی



شکل ۲- منحنی‌های نگهداشت خاک SiL در سیستم‌های دوفازی، برای سیالات آب و تری‌کلرواتن.

Figure 2. Retention curves in two-phase systems for water and Trichlorethylene in SiL soil.

آب و تری‌کلرواتن. P. TCE و P. Water به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده آب و تری‌کلرواتن و M. TCE و M. Water به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده

نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴ می‌توان دریافت که برای سیال آب، مدل ون‌گنوختن بیش‌ترین کارایی (۰/۹۳) و کم‌ترین خطای باقی‌مانده (۰/۰۱۸) را نسبت

جدول ۴ آماره‌های مربوط به برآورد منحنی‌های نگهداشت SiL بر مبنای مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس-کوری و کوسوگی را در سیستم‌های دوفازی

کوری و کوسوگی بیش برآوردی را نشان داده‌اند. نتایج پژوهش چترنور و همکاران (۲۰۱۶) برای سیال پرکلرواتیلن نیز نشان داد که مدل ون‌گنوختن نسبت به دو مدل بروکس-کوری و کوسوگی از دقت بیش‌تری برخوردار بوده و مقدار پارامترهای توزیع تخلخل و نقطه ورود هوا در سیستم دوفازی آب-هوا نسبت به پرکلرواتیلن-هوا کاهش یافت که این رفتار به دلیل لزوجت و مقاومت بیش‌تر آب نسبت به پرکلرواتیلن در برابر جریان بود.

تری‌کلرواتن نشان می‌دهد. در دو مدل دیگر نیز کارایی مدل برای سیال آب بیش‌تر است. در مورد سیال تری‌کلرواتن، مدل ون‌گنوختن و بروکس-کوری بیش‌ترین کارایی را از خود نشان می‌دهد. دقت هر سه مدل برای تری‌کلرواتن کم‌تر از آب می‌باشد. از لحاظ شاخص آماری ME می‌توان گفت که مدل ون‌گنوختن و بروکس-کوری بیش‌ترین مقدار را برای تری‌کلرواتن دارند. همچنین، CRM مثبت نشان‌دهنده کم‌برآوردی و CRM منفی بیش برآوردی مدل را نشان می‌دهد که هر سه مدل ون‌گنوختن، بروکس-

جدول ۴- آماره‌های محاسبه‌شده برای ارزیابی مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس-کوری و کوسوگی در خاک SiL.

Table 4. Calculated statistics for evaluating performance of van Genuchten, Brooks-Corey and Kosugi models in SiL soil.

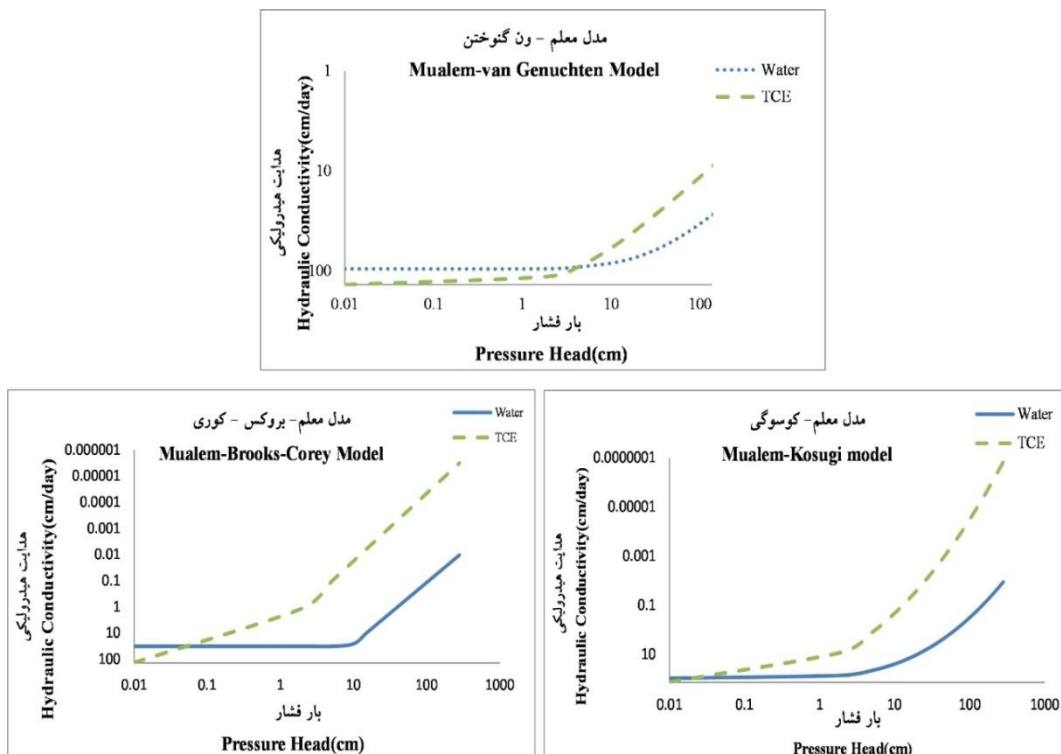
مدل Model	ME (%)	RMSE (%)	CD(-)	EF (-)	CRM (-)	سیال Fluid
ون‌گنوختن van Genuchten	0.088	0.026	1.18	0.90	-0.0102	تری‌کلرواتن Trichloroethylene
	0.050	0.018	1.21	0.93	-0.027	آب Water
بروکس-کوری Brooks and Corey	0.1	0.03	1.017	0.88	-0.03	تری‌کلرواتن Trichloroethylene
	0.058	0.027	1.213	0.90	-0.0101	آب Water
کوسوگی Kosugi	0.12	0.045	0.94	0.81	-0.066	تری‌کلرواتن Trichloroethylene
	0.037	0.028	1.05	0.89	-0.008	آب Water

هدایت هیدرولیکی اشباع و نتایج به‌دست آمده از منحنی نگهداشت این سیالات بر اساس مدل‌های معلم-ون‌گنوختن، معلم-بروکس-کوری و معلم-کوسوگی در سیستم‌های دوفازی تعیین شد. منحنی‌های برآورد هدایت هیدرولیکی خاک SiL بر مبنای مدل‌های معلم-ون‌گنوختن، معلم-بروکس-کوری و معلم-کوسوگی در سیستم‌های دوفازی، در شکل ۳

هدایت هیدرولیکی غیراشباع: مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع سیالات با استفاده از روش بار ثابت در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که آب به‌دلیل لزوجت سینماتیکی بیش‌تر و چگالی کم‌تر نسبت به تری‌کلرواتن، هدایت هیدرولیکی اشباع کم‌تری را در خاک SiL دارد. منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع سیالات، با استفاده از مقدار

سانتی متر این روند در هر سه مدل به وضوح مشاهده می‌شود. به دلیل وضعیت منحنی نگهداشت خاک SiL برای آب، هدایت هیدرولیکی آب کم‌تر از تری‌کلرواتن است. برآورد مدل‌های معلم-ون‌گنوختن، معلم-بروکس و کوری و معلم-کوسوگی برای تری‌کلرواتن و آب در مکش‌های بیش‌تر از ۱۰ سانتی متر به صورت تری‌کلرواتن < آب است. شیب منحنی هدایت هیدرولیکی در شکل ۳ در هر سه مدل به صورت تری‌کلرواتن < آب است که در این مورد هم با توجه به رفتار نگهداشت این سیالات قابل انتظار است.

نشان داده شده است. در روند کلی برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع بر اساس هر سه مدل معلم-ون‌گنوختن و معلم-بروکس و کوری و معلم-کوسوگی، مشاهده می‌شود که هدایت هیدرولیکی غیراشباع آب کم‌تر از تری‌کلرواتن است (به‌استثنای مقادیر نزدیک به اشباع به‌ویژه در مدل معلم-ون‌گنوختن). این نتیجه با توجه به وضعیت منحنی نگهداشت خاک SiL برای آب و تری‌کلرواتن (که سیال آب نگهداشت بیش‌تری نسبت به تری‌کلرواتن دارد) قابل توجیه است و بر این اساس مقدار هدایت هیدرولیکی غیراشباع آب کم‌تر از تری‌کلرواتن برآورد شده است. در شکل ۳ و در مکش بیش‌تر از ۱۰



شکل ۳- منحنی برآورد هدایت هیدرولیکی خاک SiL بر مبنای مدل‌های معلم-ون‌گنوختن، معلم-بروکس-کوری و معلم-کوسوگی در سیستم‌های دو فازی مورد مطالعه.

Figure 3. The estimated Hydraulic conductivity curve in SiL soil based on Mualem-van Genuchten, Mualem-Brooks-Corey and Mualem-Kosugi models in the studied two-phase systems.

### نتیجه‌گیری کلی

سیستم دوفازی تری‌کلرواتن- هوا است. بر اساس نتایج اعتبارسنجی مدل‌های هیدرولیکی، مدل ون‌گنوختن پیش‌بینی بهتری از مدل‌های کوسوگی و بروکس- کوری در نگهداشت خاک در سیستم‌های دوفازی آب- هوا و پرکلرواتیلن- هوا ارائه می‌نماید. در نهایت با توجه به این‌که سیال تری‌کلرواتن نسبت به آب هدایت هیدرولیکی اشباع بیشتر و نگهداشت کم‌تری در محیط متخلخل دارد، در صورتی‌که وارد خاک شود حرکت سریع‌تری به سمت آب‌های زیرزمینی خواهد داشت و چنان‌چه وارد آب‌های زیرزمینی شود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب را تغییر داده و سبب بروز خسارات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست می‌شود.

نتایج نشان داد که نگهداشت خاک برای آلاینده کلردار تری‌کلرواتن از آب کم‌تر بوده و نیز مقدار پارامترهای توزیع تخلخل یا شیب منحنی نگهداشت ( $\sigma$  و  $\lambda, n$ ) و پارامتر عکس مکش در نقطه ورود هوا به خاک ( $\alpha$ ) در مدل‌های هیدرولیکی در حضور تری‌کلرواتن افزایش می‌یابد. با توجه به گرانی‌تر و چگالی بیشتر تری‌کلرواتن نسبت به آب، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای این سیال بیشتر از آب است. ولی با افزایش مکش، هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک نیز برای تری‌کلرواتن از آب بیشتر می‌شود که دلیل این امر بیشتر بودن حجم مایع خاک در سیستم دوفازی آب- هوا نسبت به

### منابع

1. Adams, K.A. 2000. Investigation into dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) transport and remediation in vertical fractures. M.Sc. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology Press. 66p.
2. Aminian, K., Ameri, S., and Bilgesu, H.I. 2002. A New Approach for Reservoir Characterization. Paper SPE 78710 presented at the SPE Eastern Regional Meeting, Lexington, Kentucky, USA., 23-25 October.
3. Becher, H.H. 2001. Soil physical properties of subsoils contaminated with light nonaqueous phase liquids (LNAPLs). J. Plant Nutr. Soil Sci. 164: 5. 579-584.
4. Brooks, R.H., and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Papers, Colorado State University, March. 27p.
5. Chatrenour, M., Homae, M., Asadi Kapourchal, S., and Mahmoodian Shoshtari, M. 2016. Parametric assessment of perchloroethylene hydraulic behavior in a two-phase system. J. Environ. Sci. 14: 1. 29-38. (In Persian)
6. Dane, J., Oostrom, M., and Missildine, B. 1994. Determination of capillary pressure-saturation curves involving TCE, water, and air for a sand and a sandy clay loam. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency. Washington, D.C. EPA/600/SR-94/005.
7. Homae, M., Dirksen, C., and Feddes, R. 2002. Simulation of root water uptake: I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. Agricultural Water Management. 57: 2. 89-109.
8. Kechavarzi, C., Soga, K., and Illangasekare, T.H. 2005. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. J. Contaminant Hydrol. 76: 3-4. 211-233.
9. Kosugi, K.I. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resources Research, 32: 2697-2703.
10. Lenhard, R. 1992. Measurement and modeling of three-phase saturation-pressure hysteresis. J. Contaminant Hydrol. 9: 3. 243-269.

11. Lenhard, R.J., Ostrom, M., and Dane, J.H. 2004. A constitutive model for air-NAPL-water flow in the vadose zone accounting for immobile, non-occluded (residual) NAPL in strongly water-wet porous media. *J. Contaminant Hydrol.* 71: 1-4. 261-282.
12. Leverett, M.C. 1941. Capillary behavior in porous media. *Trans. AIME.* 142: 341-358.
13. Mualem, Y. 1978. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach. *Water Resources Research.* 14: 2. 325-334.
14. Nouri, M., Homaei, M., and Bybordi, M. 2012. Parametric assessment of soil hydraulic functions at presence of Kerosene contaminant. *J. Water Soil Resour. Cons.* 2: 1. 37-48. (In Persian)
15. Nouri, M., Homaei, M., and Bybordi, M. 2013. Parametric assessment of soil retention at presence of petroleum in three-phase system. *J. Water Soil Resour. Cons.* 2: 2. 15-24. (In Persian)
16. Nouri, M., Homaei, M., and Bybordi, M. 2014. Quantitative Assessment of LNAPL Retention in Soil in Porous Media. *Soil and Sediment Contamination.* 23: 801-819.
17. Parker, J., and Lenhard, R. 1987. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: 1. Saturation-pressure relations. *Water Resources Research.* 23: 12. 2187-2196.
18. Pennell, K.D., Pope, G.A., and Abriola, L.M. 1996. Influence of viscous and buoyancy forces on the mobilization of residual tetra chloroethylene during surfactant flushing. *Environmental Science & Technology.* 30: 4. 1328-1335.
19. Shirazi, M.A., and Boersma, L. 1984. A Unifying Quantitative Analysis of Soil Texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48: 1. 142-147.
20. Van Geel, P., and Roy, S. 2002. A proposed model to include a residual NAPL saturation in a hysteretic capillary pressure-saturation relationship. *J. Contaminant Hydrol.* 58: 1. 79-110.
21. van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44: 5. 892-898.
22. Vanapalli, S.K., Nicotera, M., and Sharma, R.S. 2008. Axis translation and negative water column techniques for suction control. *Geotechnical and Geological Engineering.* 26: 6. 645-660.
23. Walser, G.S., Illangasekare, T.H., and Corey, A.T. 1999. Retention of liquid contaminants in layered soils. *J. Contaminant Hydrol.* 39: 1-2. 91-108.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(3), 2019*

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.14740.2977

## Hydraulic Behavior of Trichloroethylene (TCE) contaminated soil

M. Chatrenour<sup>1</sup>, \*M. Homae<sup>2</sup>, S. Asadi Kapourchal<sup>3</sup>  
and M. Mahmoodian Shoshtari<sup>4</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran,

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran,

<sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht,

<sup>4</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz

Received: 02.14.2018; Accepted: 04.09.2019

### Abstract

**Background and Objectives:** The retention and hydraulic conductivity are important characteristics of porous media in relation to imposed contaminants. Retention curve and hydraulic conductivity are dependent on soil and fluid characteristics. When entering groundwater, Chlorinated contaminants cause contamination due to the type of compounds. Thus preventing these materials to enter soil and water is crucial to avoid any contamination. In order to investigate the hydraulic behavior of Trichloroethylene in soil, the retention of Trichloroethylene and water were determined. Determining the saturated hydraulic conductivity and estimating the unsaturated hydraulic conductivity by Mualem -van Genuchten, Mualem -Brooks-Corey and Mualem-Kosugimodels in the two-phase NAPL-air systems were other objectives of this study.

**Materials and Methods:** In this study, the hydraulic behavior of both Trichloroethylene fluid and water were examined. In order to draw the water and Trichloroethylene retention curves in silty loam soil texture, the hanging water column method was used. The constant head method was employed to determine the saturated hydraulic conductivity. The soil retention parameters for Trichloroethylene and water were obtained based on van Genuchten, Brooks-Corey and Kosugi retention models, using the RETC program. The unsaturated hydraulic conductivity, for both fluids as a function of Matric potential was obtained based on Mualem-Brooks-Corey, Mualem-van Genuchten and Mualem-Kosugi models. The performances of these models were assessed by some statistics including ME, RMSE, EF, CD and CRM.

**Results:** The obtained results indicated that in a certain amount of liquid phase, Trichloroethylene has lower retention and larger hydraulic conductivity compared to water in soil. According to lower surface tension and viscosity of Trichloroethylene compared to water, the saturated hydraulic conductivity of Trichloroethylene and water were 136.75 and 94.50 cm/day, respectively. For water, the van Genuchten retention model demonstrated highest EF (0.93) and lowest RMSE (0.018) values compared to Trichloroethylene fluid. The other two models were also provided better efficiency for water than Trichloroethylene. In case of Trichloroethylene, the van Genuchten and Brooks-Corey models showed highest efficiency. Generally, the accuracy of all three models for Trichloroethylene was less than water.

**Conclusions:** The validation results of hydraulic models shows that the van Genuchten model provides better prediction for retention in soil compared to Kosugi and Brooks-Corey models in the two-phase air-water and air-Trichloroethylene systems. Finally, due to the higher hydraulic conductivity and less maintenance of Trichloroethylene fluid than water, if entering the soil, it will move faster towards groundwater and, if introduced into the aquifer, will cause contamination and change in water quality.

**Keywords:** Chlorinated contamination, Groundwater, Retention curve, Saturated hydraulic conductivity

---

\* Corresponding Author; Email: mhomae@modares.ac.ir