

## مقایسه ویژگی‌های هیدرولیکی آب و نفت خام در خاک

میلاذ نوری، مهدی همایی\* و محمد بای‌بوردی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۲۵)

### چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی رفتار هیدرولیکی نفت خام در خاک بود. بدین منظور، منحنی‌های نگهداشت خاک برای نفت خام و آب به‌وسیله دستگاه ستون آویزان و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای این سیالات به روش بار پایا تعیین شد. پارامترهای منحنی‌های نگهداشت خاک برای آب و نفت خام براساس مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس-کوری و کمپبل برآورد شد. هدایت هیدرولیکی غیر اشباع به‌عنوان تابعی از پتانسیل ماتریک خاک به‌وسیله مدل‌های معلم-ون‌گنوختن، معلم-بروکس-کوری، بوردین-بروکس-کوری و کمپبل تعیین شد. آنگاه، دقت مدل‌ها به‌وسیله آماره‌های  $ME$ ،  $RMSE$ ،  $EF$ ،  $CD$  و  $CRM$  بررسی شد. مقدار پارامترهای توزیع تخلخل و نقطه ورود هوا در سیستم دو فاز نفت خام-هوا نسبت به آب-هوا کاهش یافت. نتایج نشان دادند که به‌دلیل رفتار غیرمعمول نفت خام و برهمکنش‌های بین نفت خام و خاک که سبب باقی ماندن مقدار زیادی نفت خام در محیط متخلخل می‌شود، مکش بیشتری برای خارج کردن نفت خام از خاک نسبت به آب لازم است. بنابراین خاک مورد آزمایش در یک مقدار معین از فاز مایع، نگهداشت بیشتری برای نفت خام نسبت به آب دارد. به‌دلیل لزوجت زیاد نفت خام، هدایت هیدرولیکی اشباع نفت خام کمتر از آب بود. لیکن، در مکش‌های بیشتر از ۱۰۰ سانتی‌متر، هدایت هیدرولیکی نفت خام بیشتر بود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های هیدرولیکی خاک، منحنی نگهداشت خاک، نفت خام، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [mhomaee@modares.ac.ir](mailto:mhomaee@modares.ac.ir)

## مقدمه

مایع خاک هستند. بنابراین با تغییر ویژگی‌های فیزیکی مایع خاک منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی نیز تغییر می‌کند (۱۳). لزوجت، کشش سطحی و زاویه تماس (Contact angle) از ویژگی‌های مایع خاک هستند که تحت تأثیر حضور DNAPLها در خاک قرار می‌گیرند. اولین بار لورت (۱۹۴۱) بر مبنای نسبت کشش سطحی جفت سیالات فاکتور مقیاسی (Scaling factor) خود را ارائه داد. با توجه به فرض‌های لورت و با در اختیار داشتن مقدار کشش سطحی سیالات و داده‌های منحنی نگهداشت یک جفت سیال (مانند آب- هوا) می‌توان منحنی نگهداشت جفت سیالات دیگر (مانند نفت خام- هوا) را برآورد کرد (۲۲).

همچنین می‌توان بر مبنای داده‌های منحنی نگهداشت خاک در سیستم دو فازی، منحنی نگهداشت خاک در سیستم سه فازی را پیش‌بینی کرد (۱). پارکر و لنهارد (۲۸) و لنهارد و پارکر (۲۰) با استفاده از فرضیات لورت، مدل‌های ون‌گونختن و معلم- ون‌گونختن را برای سیستم سه فازی هوا- آب- NAPL و سیستم دو فازی NAPL- هوا در یک خاک شنی اصلاح کردند. همچنین براساس پژوهش دموند و روبرت (۱۱) فاکتور مقیاسی لورت به دلیل در نظر نگرفتن اثرهای چگالی و زاویه تماس سیال- محیط متخلخل بر منحنی نگهداشت خاک در تمامی موارد قادر به برآورد منحنی نگهداشت خاک نمی‌باشد. مشکل اساسی دیگر فاکتور مقیاسی لورت عدم توجه به برهمکنش‌های سیال- محیط می‌باشد. به عبارت دیگر در روش مقیاسی لورت بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های هندسی خاک فقط ویژگی‌های سیال در نظر گرفته شده است. در حالی که منحنی نگهداشت خاک به مقدار زیادی به توزیع اندازه ذرات، هندسه خلل و فرج محیط و برهمکنش‌های سیال- آب وابسته است (۷). بنابراین با دور شدن سیستم از حالت ایده‌آل و واکنش‌ناپذیر (مانند وجود مقدار زیادی رس و یا حضور سیالات واکنش‌پذیر با رفتارهای غیرمعمول و پیچیده) اعتبار فاکتور مقیاسی لورت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. لنهارد و بروکس (۲۱) برای بررسی اثر متقابل مایع- رس به مقایسه منحنی

آلاینده‌های هیدروکربنی به دو گروه سیالات با چگالی کمتر از آب LNAPLs (Light Non-Aqueous phase Liquids) و با چگالی بیشتر از آب DNAPL (Dense Non-Aqueous phase Liquids) تقسیم می‌شوند (۳۷). ترکیبات شیمیایی رها شده در خاک ممکن است به صورت گاز، حل شده در آب و یا به صورت توده مایع و غیراختلاط‌پذیر در آب، در یک محیط متخلخل حرکت کنند (۴). تحرک و نگهداشت مواد هیدروکربنی در محیط متخلخل به قابلیت خیس‌کنندگی سیال (Wettability)، توزیع خلل و فرج خاک، ویژگی‌های فیزیکی آلاینده همچون گرانشی دینامیکی، جرم ویژه و کشش سطحی و شیب هیدرولیکی محیط وابسته است (۲۵).

معادله دیفرانسیلی غیرخطی ریچاردز (۲۹) حرکت سیالات در محیط متخلخل غیراشباع را توصیف می‌کند. این معادله برای محیط‌های متخلخل تراکم‌ناپذیر در شرایط دو فازی NAPL- هوا و آب- هوا به صورت زیر نوشته می‌شود (۲):

$$\xi \left( \frac{\partial S_w}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \{ (K_{rw} k_w (\nabla h_w + \nabla z)) \} \quad [1]$$

$$\xi \left( \frac{\partial S_o}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \{ (K_{ro} k_o (\nabla h_o + \nabla z)) \} \quad [2]$$

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) i + \left( \frac{\partial}{\partial y} \right) j + \left( \frac{\partial}{\partial z} \right) k \quad [3]$$

که در آنها  $\xi$  تخلخل خاک،  $S_o$  و  $S_w$  درصد حجمی به ترتیب آب و NAPL،  $K_o$  و  $K_w$  هدایت هیدرولیکی محیط برای آب و NAPL،  $K_{ro}$  و  $K_{rw}$  نفوذپذیری نسبی محیط برای آب و NAPL،  $z$  پتانسیل ثقلی،  $h_o$  و  $h_w$  پتانسیل ماتریک محیط برای آب و NAPL و  $i$ ،  $j$  و  $k$  به ترتیب بردارهای واحد در جهت‌های کارتزینی  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشند.

حل معادله ریچاردز نیازمند وجود تابع پیوسته مقدار حجمی فاز مایع و هدایت هیدرولیکی خاک به عنوان تابعی از پتانسیل ماتریک خاک است (۳۵ و ۳۶). منحنی نگهداشت خاک (Soil retention curve) رابطه بین پتانسیل ماتریک و مقدار حجمی فاز مایع خاک را نشان می‌دهد. منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی محیط‌های متخلخل تابع ویژگی‌های خاک و

که در آن  $\alpha$  پارامتر نقطه ورود هوا (Air entry value or bubbling pressure)،  $\lambda$  پارامتر چگونگی توزیع تخلخل،  $S_e$  اشباع مؤثر،  $\theta_s$  مقدار حجمی فاز مایع خاک در حالت اشباع خاک و  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده (Residual Saturation) است. کمپیل (۸) نیز معادله تجربی زیر را برای پیش‌بینی رابطه پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک ارائه داده است:

$$\theta = \theta_s \left( \frac{h}{h_0} \right)^{-1/b} \quad [5]$$

که در آن  $h_0$  پتانسیل ماتریک خاک در نقطه ورود هوا به خاک و  $b$  پارامتر توزیع تخلخل و برابر با عکس  $\lambda$  (معادله ۴) است. ون‌گنوختن (۳۴ و ۳۵) نیز مدلی برای برآورد منحنی نگهداشت خاک ارائه داده است که برای دامنه وسیعی از محیط‌های متخلخل کارایی مطلوبی ارائه نموده است:

$$S_e = (1 + (\alpha h)^n)^{-m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad [6]$$

که در آن  $m$  و  $n$  پارامترهای شیب منحنی نگهداشت خاک و  $\alpha$  با عکس پتانسیل ماتریک نقطه ورود هوا به خاک متناسب است. پژوهش‌های زیادی برای مدل‌سازی هیدرولیکی محیط‌های متخلخل انجام شده است (۱۹، ۲۷). در یکی از پژوهش‌ها، بروتسارت (۵) مدل‌های برآورد هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل را به سه دسته مدل‌های تخلخل یکنواخت (Uniform Pore Size Models)، تخلخل موازی (The Parallel Models) و سری‌های موازی (The Series-Parallel Models) تقسیم‌بندی کرده است. بوردین (۶) با توجه به پژوهش‌های پورسل و فرضیات مدل‌های تخلخل موازی، مدل خویش را به صورت زیر ارائه داد:

$$K_r = S_e^2 \left[ \int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)^2} / \int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)^2} \right] \quad [7]$$

که در آن  $S_e^2$  با معکوس فاکتور اعوجاج خاک (Tortuosity) در ارتباط است.

بروکس و کوری (۳) با ترکیب مدل ۴ با مدل بوردین، مدل برآورد هدایت هیدرولیکی بوردین-بروکس-کوری (مدل ۸) را ارائه داده‌اند:

نگهداشت چند بستر رسی برای مایعات قطبی (آب) و غیرقطبی (سالترو (Soltrol)) پرداختند. آنها برای برآورد منحنی نگهداشت مایعات از مدل سو و بروکس (۳۳) استفاده کردند. نتایج لنهاارد و بروکس نشان داد که در مقدار معینی از مایع خاک، آب توسط بسترهای رسی با نیروی بیشتری نگهداشته می‌شود. آنها دلیل نگهداشت کمتر سالترو را کشش سطحی کم این سیال دانسته‌اند. هوست-مادسون و هوگ-جنسن (۱۵) نگهداشت و توانایی هدایت دو محیط متخلخل شنی را برای دو LNAPL مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که نگهداشت خاک‌ها برای سیاله‌های هیدروکربنی کمتر از آب است. جارسجو و همکاران (۱۷) منحنی نگهداشت آب و نفت سفید را در چند خاک یخ رفتی (Glacial soil) به دست آوردند. نتایج آنها نشان داد که نگهداشت نفت سفید تقریباً ۱/۱۵ برابر کمتر از آب در محیط‌های متخلخل می‌باشد. شارما و محمد (۳۰) در دامنه محدودی از پتانسیل ماتریک، منحنی‌های نگهداشت یک خاک شنی را در سیستم‌های دو فازی آب-هوا و LNAPL-هوا مورد بررسی قرار دادند. آنها هم‌چنین برای برآورد منحنی‌های نگهداشت مایع خاک در محیط‌های دو فازی از مدل ون‌گنوختن استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که مقدار پارامترهای توزیع تخلخل مدل ( $m$  و  $n$ ) و پارامتر نقطه ورود هوا به خاک مدل ( $\alpha$ ) برای ماده نفتی نسبت به آب افزایش یافت، که این حاکی از کاهش نگهداشت محیط متخلخل شنی برای LNAPL بود. ماکو (۲۳) منحنی نگهداشت خاک برای LNAPL‌ها را با استفاده از ویژگی‌های زود یافت مقدار ماده آلی، توزیع اندازه ذرات و مقدار کلسیم خاک برآورد کرد. او از روش رگرسیون برای اشتقاق تابع انتقالی منحنی نگهداشت LNAPL‌ها استفاده کرد.

تاکنون تلاش‌های بسیاری برای مدل‌سازی منحنی نگهداشت خاک صورت گرفته است (۱۹). بروکس و کوری (۳) با به کار بردن ماده نفتی سالترو مدلی تجربی برای برآورد منحنی نگهداشت خاک ارائه کرده‌اند:

$$S_e = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = (\alpha h)^{-\lambda} \quad [4]$$

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش.

بافت	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	تخلخل حجمی (%)	$\rho_b$ (g.cm <sup>-3</sup> )	$\rho_p$ (g.cm <sup>-3</sup> )	dg (mm)	$\sigma_g$
sandy loam	۶۲/۷	۲۶/۷	۱۰/۶	۴۸/۸	۱/۲۹	۲/۵۲	۰/۱۸	۱۱/۰۲

سیالات پرداخت. هدف از انجام این پژوهش، بررسی رفتار هیدرولیکی و نگهداشت نفت‌خام به‌عنوان یک ماده هیدروکربنی با رفتاری غیرمعمول و آب در خاک، و مقایسه آنها با یکدیگر می‌باشد. هم‌چنین برآورد منحنی نگهداشت خاک به‌وسیله مدل‌های ون‌گونختن، بروکس-کوری و کمپیل و منحنی هدایت هیدرولیکی خاک به‌وسیله مدل‌های معلم-بروکس-کوری، بوردین-بروکس-کوری، معلم-ون‌گونختن و کمپیل و بررسی دقت پیش‌بینی مدل‌ها از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

برخی ویژگی‌های خاک مورد آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، پارامترهای فیزیکی  $\sigma_g$  و  $d_g$  به‌ترتیب انحراف معیار هندسی و میانگین هندسی قطر ذرات خاک می‌باشند (۳۱).

هم‌چنین از طریق آزمایش ستون‌های الک، توزیع اندازه ذرات خاک تعیین و رسم شد. شکل ۱ توزیع اندازه ذرات خاک را نشان می‌دهد.

آلاینده به‌کار رفته در این پژوهش، نفت خام (Petroleum) بود. نفت خام آمیزه پیچیده‌ای از هیدروکربن‌های گوناگون است. رفتار هیدرولیکی نفت‌خام تا حدودی شبیه سیالات غیرنیوتنی (Non-Newtonian fluids) است. ویژگی‌های فیزیکی سیالات در ۲۵ درجه سانتی‌گراد جدول ۲ ارائه شده است.

در این پژوهش برای رسم منحنی‌های نگهداشت آب و نفت خام برای خاک از دستگاه ستون آویزان (Hanging column) استفاده شد. برای تعیین منحنی نگهداشت تجربی خاک، ابتدا نمونه‌های خاک برای اعمال جرم ویژه ظاهری خاک در یک استوانه فشرده شدند. سپس نمونه‌های خاک بر روی صفحه سرامیکی قیف بوخنر (Buchner funnel) دستگاه ستون آویزان

$$K_r = S_e^{(r+\frac{r}{\lambda})} \quad [8]$$

مدل‌های سری‌های موازی نوعی مدل تخلخل موازی هستند که در آنها فرض قطع و بازاتصال (Cut and rejoining theory) لحاظ شده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل معلم (۲۶) اشاره کرد.

$$K_r = S_e^{0.5} \left[ \int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)} / \int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)} \right]^2 \quad [9]$$

که در مدل معلم، پارامتر باز اتصالی منافذ خاک برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

ون‌گونختن (۳۵) مدل منحنی نگهداشت ون‌گونختن (معادله ۶) و مدل بروکس-کوری (معادله ۴) را با مدل معلم تلفیق و نتایج حاصل از مدل‌های تلفیقی معلم-بروکس-کوری (مدل ۱۰) و معلم-ون‌گونختن (مدل ۱۱) را مقایسه کرده است:

$$K_r = S_e^{(r/5+\frac{r}{\lambda})} \quad [10]$$

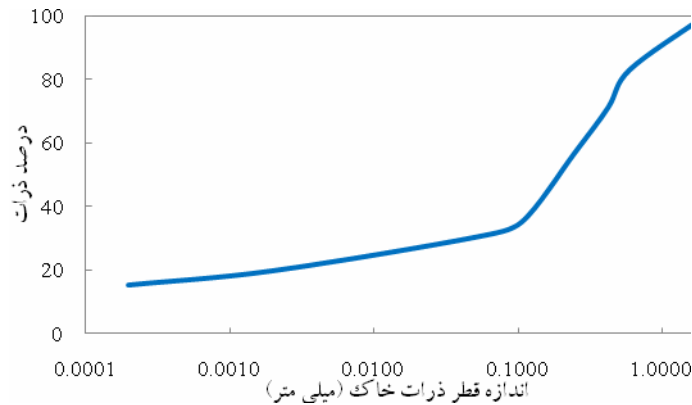
$$K_r = S_e^{0.5} \{1 - [1 - S_e^m]^m\}^2 \quad [11]$$

هم‌چنین کمپیل (۸) با حل چاپلندز و کولیس-جورج (۹)، مدل هدایت هیدرولیکی خود را به‌صورت زیر ارائه داد:

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{2b+2+p} \quad [12]$$

که در آن، فرض  $p=1$  نتایج مناسب‌تری برای اکثر نمونه‌های خاک ارائه می‌دهد (۱۶).

اغلب پژوهش‌های نگهداشت NAPLها، در محیط‌های شنی و واکنش‌ناپذیر و در حضور سیالات واکنش‌ناپذیر آلکانی مثل سالتروال انجام شده‌اند. همان‌طور که اشاره شد حضور سیالات واکنش‌پذیر با رفتارهای غیرمعمول و پیچیده در محیط‌های متخلخل طبیعی همانند خاک موجب می‌شود زیر سؤال رفتن اعتبار نظریه مقیاسی لورت می‌شود. بنابراین دیگر نمی‌توان بر مبنای کشش سطحی جفت سیالات به برآورد منحنی نگهداشت



شکل ۱. منحنی توزیع اندازه ذرات خاک مورد مطالعه

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی نفت خام به کار رفته در آزمایش

نام سیال	وزن مخصوص ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	گرانروی سینماتیکی ( $\text{cst}^{\text{ب}}$ )	گرانروی دینامیکی ( $\text{cp}^{\text{الف}}$ )	کشش سطحی ( $\text{dyne/cm}$ )
نفت خام	۰/۸۷	۸/۹	۷/۸	۲۸/۶ <sup>۳</sup>
آب	۰/۹۷۷ <sup>۴</sup>	۰/۸۹۷ <sup>۴</sup>	۰/۸۹۴ <sup>۴</sup>	۷۲/۶ <sup>۴</sup>

الف. سانتی پواز، ب. سانتی استوکس، ۳. (۱۱) ۴. (۳۲)

ظاهری، خاک فشرده شد. برای جلوگیری از حبس هوا و هم‌چنین بهم‌خوردگی سطح خاک در اثر تلاطم جریان، جریان سیالات به خاک از پایین به بالا برقرار شد. هم‌چنین با قرار دادن گلوله‌های شیشه‌ای در محل ورود آب به خاک (انتهای ستون خاک) از تخریب خاک در اثر جریان جلوگیری شد. پس از اعمال جریان یکنواخت تحت بار فشار ثابت، دبی سیال عبور کرده از خاک در مدت زمان مشخصی محاسبه شد. سپس با حل معادله داری مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای آب و نفت خام به دست آمد.

منحنی نگهداشت آب و نفت خام توسط تابع هیدرولیکی ون‌گنوختن ((van Genuchten (VG)، بروکس- کوری (Brooks-Corey (BC) و کمپبل (Campbell) پیش‌بینی شد. هم‌چنین، منحنی هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و نفت خام بر مبنای مدل‌های معلم- بروکس- کوری (M-BC)، بوردین- بروکس- کوری (B-BC)، معلم- ون‌گنوختن (M-VG) و کمپبل برآورد شد. برای بررسی دقت پیش‌بینی مدل‌ها از آماره‌های خطای حداکثر (Maximum Error)، ریشه میانگین مربعات خطا

قرار گرفته و از زیر با مایع خیس‌کننده سیستم (نفت خام یا آب) اشباع شدند. با تنظیم ارتفاع سطح مایع خیس‌کننده در شاخه آزاد دستگاه از نمونه خاک (h)، نمونه‌های خاک تحت مکش‌های مشخصی قرار گرفتند. 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 شده و با کم کردن حجم سیال خارج شده از حجم مایع خاک قبل از اعمال مکش، مقدار حجمی مایع خاک محاسبه شد. مقدار پتانسیل ماتریک مایع خاک نیز با محاسبه اختلاف سطح مایع خیس‌کننده در شاخه آزاد و نمونه‌های خاک (h) به دست آمد. بدین ترتیب رابطه پتانسیل ماتریک و مقدار حجمی مایع خاک (منحنی نگهداشت تجربی مایع خاک) حاصل شد.

از روش بار پایا (Constant Head Method) برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای نفت خام و آب استفاده شد. مقدار مشخصی از خاک مورد مطالعه را درون استوانه شفاف و با ابعاد معینی ریخته و سپس برای اعمال جرم ویژه

بروکس- کوری و کمپبل برای آب و نفت خام را نشان می دهد.

همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، در یک مقدار فاز مایع حجمی، مقدار مکش بیشتری برای زه کشی نفت خام نسبت به آب لازم است. بر مبنای جدول ۲، مقدار کشش سطحی آب حدود ۲/۵ برابر نفت خام است. بنابراین انتظار می رود که بر مبنای نظریه لورت در یک مقدار معین مایع خاک، آب با نیروی حدود دو و نیم برابر نفت خام در محیط نگهداشته شود. لیکن وجود مقدار زیاد آسفالت در ترکیب نفت خام سبب بروز ویژگی ها و رفتارهای هیدرولیکی غیر معمول نفت خام از قبیل گرانروی سینماتیکی زیاد می شود. هم چنین برهمکنش های بین ترکیباتی از نفت خام مانند PAHها (polyaromatic hydrocarbon) و BTEXها (Benzene Toluene Ethylbenzene) و کانی های خاک در بروز این پدیده مؤثر است. در بسیاری از پژوهش های انجام شده بروی نگهداشت مواد آلكانی واکنش ناپذیر از قبیل سالترویل در محیط متخلخل واکنش ناپذیر نسبت کشش سطحی (روش مقیاسی لورت) فاکتور مقیاسی مناسبی برای برآورد منحنی نگهداشت سیالات بر اساس منحنی نگهداشت یک جفت سیال مینا است. اما در مورد موادی که با محیط متخلخل واکنش می دهند مثل TCE (Trichloroethene) و یا سیالاتی که رفتار سیالات غیرنیوتونی را بروز می دهند (مثل نفت خام) این فاکتور مقیاسی عملکرد مناسبی در برآورد منحنی نگهداشت سیالات ندارد. بوسیله و همکاران (۷) مقیاس سازی منحنی نگهداشت خاک در شرایط دو فازی TCE- هوا و سه فازی TCE- هوا- آب بر مبنای فرضیات لورت را به دلیل در نظر نگرفتن ویژگی های خاک و برهمکنش های سیال- محیط ناکافی ارزیابی کردند. اما تا کنون پژوهشی به منظور ارزیابی روش مقیاسی لورت برای مقیاس سازی منحنی نگهداشت نفت خام- هوا انجام نگرفته است. به تله افتادن مقدار زیادی نفت خام در تخلخل خاک نیز عامل مؤثر دیگری در نگهداشت بیشتر نفت خام توسط خاک است. هم چنین نفت خام به دلیل لزوجت زیاد

(Coefficient of Determination)، ضریب تبیین (Root Means Square Error) ضریب جرم باقی مانده (Coefficient of Residual Mass) و استفاده شد (۱۴). مقادیر RMSE بالا نشان دهنده اختلاف زیاد مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده می باشد. پیش بینی های دست پایین (Underestimate) یا دست بالا (Overestimate) یعنی این که مدل به ترتیب بیشتر و کمتر از مقادیر اندازه گیری شده برآورد کرده است (۱۰). در این پژوهش برای محاسبه RMSE از روش مارکواردت (۲۴) استفاده شد. مقادیر CD نیز، معرف نسبت بین پراکندگی مقادیر پیش بینی شده و مقادیر اندازه گیری شده است. هر چه مقدار EF به یک نزدیک تر باشد، مدل پیش بینی بهتری دارد (۱۸). شاخص CRM میل مدل به پیش بینی دست بالا یا دست پایین مدل را نشان می دهد. مقدار CRM منفی یعنی مدل مقادیر را بیشتر و CRM مثبت یعنی مدل داده ها را کمتر از داده های مشاهده شده پیش بینی کرده است. اگر مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده مدل برابر باشند،  $ME = 0$ ،  $RMSE = 0$ ،  $CD = 1$ ،  $EF = 1$  و  $CRM = 0$  است. بیان ریاضی آماره های فوق به صورت زیر است (۳۸):

$$ME = \text{Max} | P_i - O_i |_{(i=1)}^n \quad [13]$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad [14]$$

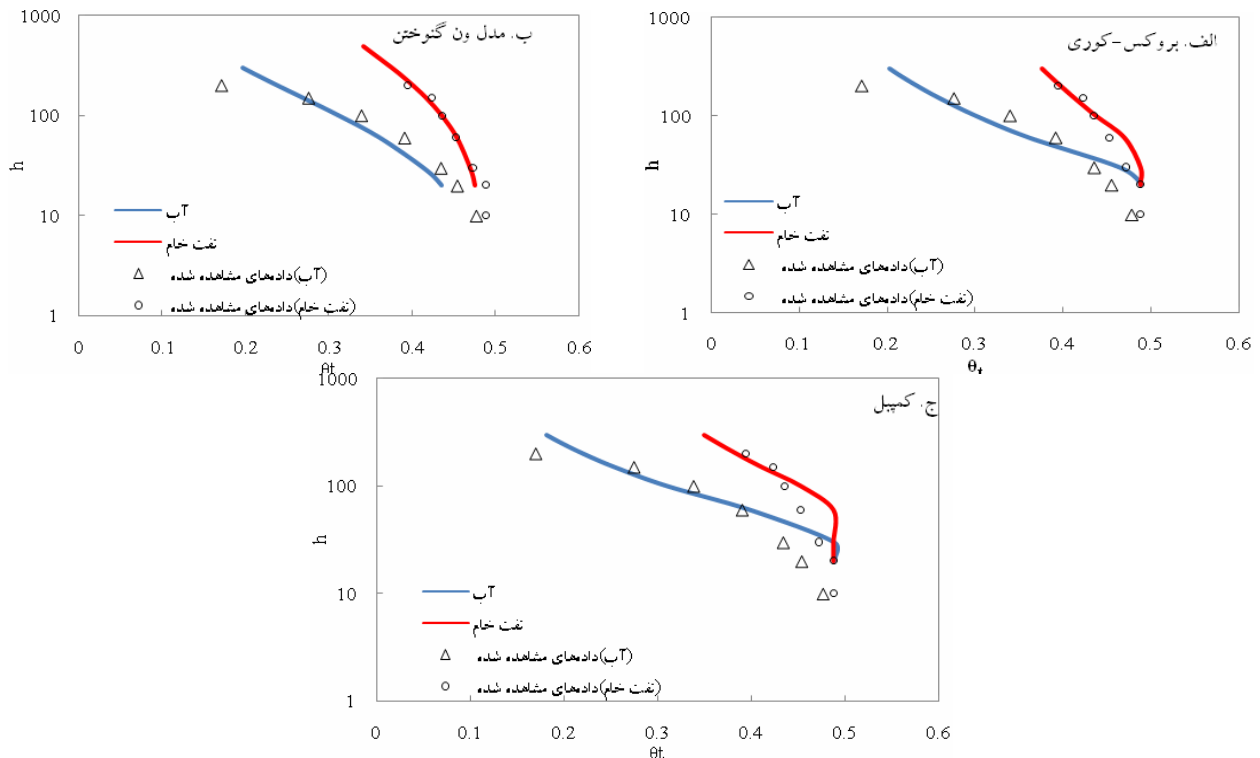
$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad [15]$$

$$EF = \left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right] / \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \quad [16]$$

$$CRM = \left[ \sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right] / \sum_{i=1}^n O_i \quad [17]$$

## نتایج و بحث

شکل ۲ داده های مشاهده شده و داده های برآورد شده منحنی های نگهداشت خاک بر مبنای مدل های ون گنوختن،



شکل ۲. منحنی‌های نگهداشت خاک برای آب و نفت خام

در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که رطوبت اشباع در این پژوهش، برای  $\theta_s$  با تخلخل کل خاک فرض شده است. پارامتر رطوبت باقی‌مانده صرفاً یک پارامتر برازش در نظر گرفته شده و براساس برون‌یابی داده‌ها به دست آمده است.

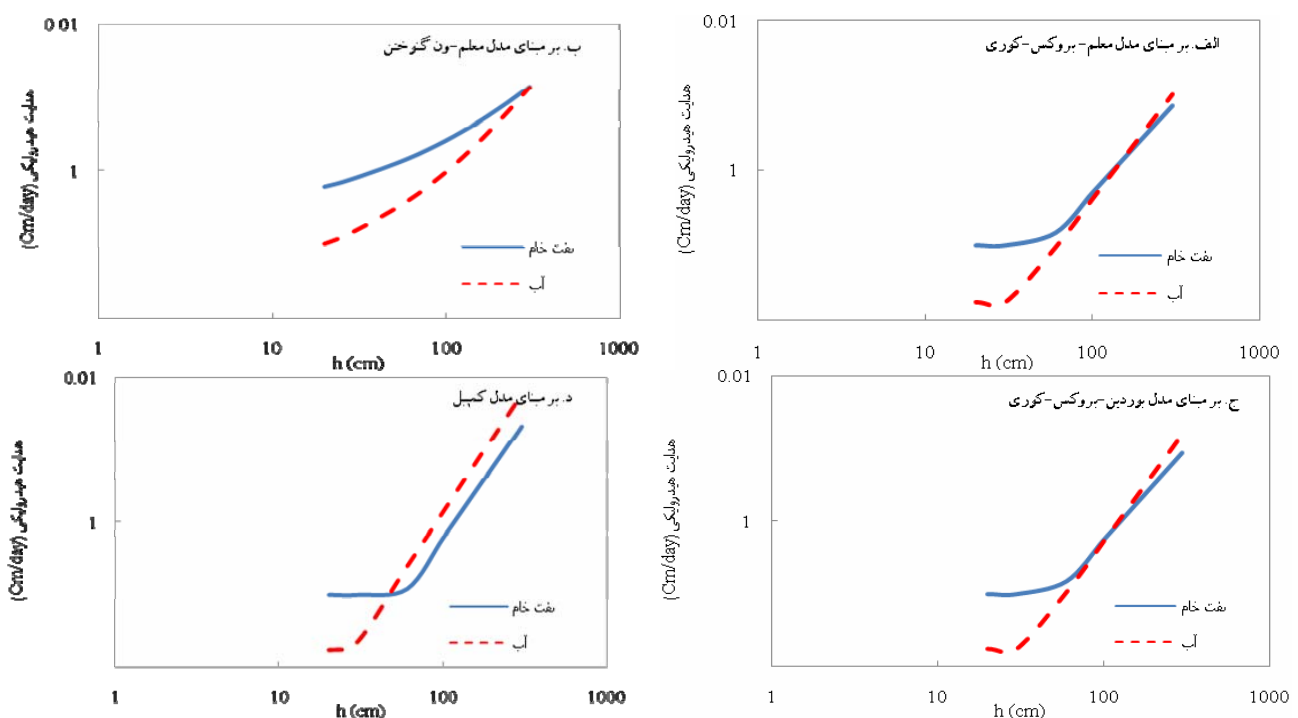
از دیدگاه پارامتریک (جدول ۳)، مقدار پارامترهای توزیع خلل و فرج یا شیب منحنی  $(m, \lambda, 1/b)$  در سیستم دو فاز نفت‌خام- هوا نسبت به آب- هوا کاهش یافته است. این کاهش نشان‌دهنده افزایش مقدار شیب در منحنی نگهداشت خاک برای سیستم دو فاز نفت‌خام- هوا است. هم‌چنین مقدار  $m$  نیز کاهش یافته است. به علاوه، مقدار پارامترهای نماینده مکش ورود هوا  $(\alpha, 1/h_0)$  در منحنی نگهداشت خاک برای سیستم دو فاز نفت‌خام- هوا نسبت به آب- هوا کاهش داشته است. با توجه به این‌که پارامترهای نماینده مکش ورود هوا با عکس نقطه ورود هوا مرتبط هستند، این کاهش نمادی از افزایش مقدار مکش ورود هوا است. این بدان معنا است که مقدار نیروی بیشتری برای خارج کردن نفت خام نسبت به آب لازم

مدت زمان بیشتری (۳ روز) برای اشباع کردن کامل خاک نیاز داشت. در این مدت زمان احتمالاً بخشی از اجزای تبخیری نفت خام از قبیل BTEXها با وجود بسته بودن ظرف، به اتمسفر تبخیر شده‌اند. در نتیجه، در یک مقدار مشخص از فاز مایع، مقدار بیشتری نیروی مکش برای خارج کردن (غلبه کردن بر نیروهای بازدارنده از حرکت) نفت خام نسبت به آب لازم است. به همین دلیل منحنی نگهداشت خاک برای نفت خام نسبت به آب در شکل ۲ بالاتر قرار گرفته است. هم‌چنین می‌توان نتیجه گرفت که حرکت نفت خام در محیط‌های متخلخل احتمالاً کندتر از آب انجام می‌شود. لیکن به دلیل نگهداشت بیشتر نفت خام توسط خاک، پس از زه‌کشی فاز مایع خاک، مقدار زیادی از این آلاینده در خاک تحت عنوان NAPL باقی‌مانده (Residual NAPL) به جای می‌ماند که می‌تواند به یک منبع آلودگی بلند مدت برای محیط زیست و آب‌های زیر زمینی تبدیل شود.

پارامترهای مدل‌های منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی

جدول ۳. پارامترهای مدل‌های منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی خاک

مدل												سیال
VG-M و VG					M-BC و BC, B-BC			Campbell		پارامترهای مشترک		
n	m	$\alpha$	$\theta_r$	$\ell$	$\alpha$	$\lambda$	$\theta_r$	$h_0$	b	$\theta_s$	$K_s$	
		$\text{cm}^{-1}$	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$		$\text{cm}^{-1}$		$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	cm		$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	$\text{cm} \cdot \text{day}^{-1}$	
۱/۷	۰/۴	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۱۶	۰/۵ <sup>۱</sup>	۰/۰۳	۰/۳۷	۰/۰۰۰۴	۳۸/۷	۲/۱	۰/۴۹	۵۷/۸۴	آب
۱/۳	۰/۲۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱	۰/۵ <sup>۱</sup>	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۰۰۷	۷۷/۶	۳/۸	۰/۴۹	۷/۲۷	نفت خام



شکل ۳. منحنی‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک مورد مطالعه برای نفت خام و آب

نفت خام بیشتر از آب است.

معادله ۱۸، تعریفی کلاسیک از هدایت هیدرولیکی اشباع محیط متخلخل است (۱۳).

$$K = K^* \left( \frac{g}{\nu} \right) \quad [18]$$

که در معادله ۱۸،  $K^*$  نفوذپذیری ذاتی (Intrinsic permeability) و نماینده خصوصیات خاک است و  $\nu$  گرانشی سینماتیکی (Kinematic viscosity) سیال و  $g$  نیز شتاب ثقل زمین است. با تغییر خصوصیات هیدرودینامیکی سیالات، مقدار  $\nu$  تغییر

است. شکل ۳ برآورد هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و نفت خام توسط مدل‌های هدایت هیدرولیکی معلم-بروکس-کوری، بوردین-بروکس-کوری، معلم-ون گنوختن و کمپل را نشان می‌دهند. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که در مکش‌های صفر و نزدیک به اشباع، مقادیر هدایت هیدرولیکی خاک برای آب بیش از نفت خام می‌باشد. لیکن در مکش‌های بیشتر، این روند تغییر در حال تغییر بوده و به نظر می‌رسد احتمالاً در پتانسیل ماتریک‌های کمتر، مقدار هدایت هیدرولیکی محیط برای



جدول ۴. آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس-کوری و کمپیل

مدل	سیال	ME (-)	RMSE (-)	CD (-)	EF (-)	CRM (-)
ون‌گنوختن	نفت خام	۱/۲۶	۰/۶۱	۱/۱۵	۰/۹۷	۰/۰۰۵
	آب	۶/۷	۳/۰۶	۱/۴	۰/۹۱	۰/۰۱۹
بروکس-کوری	نفت خام	۲/۳۶	۱/۰۷	۰/۹۱	۰/۹	-۰/۱۳
	آب	۸/۴	۳/۷۶	۰/۷۱	۰/۸۶	-۰/۰۶
کمپیل	نفت خام	۳/۵۷	۱/۶۹	۰/۷۴	۰/۷۵	-۰/۰۱۳
	آب	۵/۳۴	۳/۱۸	۰/۹۴	۰/۶	-۰/۰۳

مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل منحنی نگهداشت خاک را در نمودارهای لگاریتمی به صورت دو خط متصل شده در نقطه ورود هوا برآورد می‌کنند. این ناپیوستگی (discontinuity) در نقطه ورود هوا به خاک سبب می‌شود که مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل داده‌های منحنی نگهداشت خاک را پیش برآورد کنند (شکل‌های ۲ الف و ۲ ج). مقادیر CRM منفی در مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل نشان‌دهنده بیش‌برآوردی مدل‌ها است. ناپیوستگی مذکور در منحنی نگهداشت برآورد شده بر مبنای مدل ون‌گنوختن دیده نمی‌شود. به عبارت دیگر نگاه مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل به فرآیند ورود هوا به خاک به صورت نقطه و دیدگاه مدل ون‌گنوختن به صورت فرآیندی تدریجی می‌باشد. بنابراین بیش‌برآوردی مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل در ناحیه ورود هوا به خاک در مدل ون‌گنوختن دیده نمی‌شود (شکل ۲ ب). مقادیر CRM مثبت در مدل ون‌گنوختن نشان‌دهنده کم‌برآوردی مدل ون‌گنوختن است. به علاوه، مدل ون‌گنوختن کمترین RMSE را در بین مدل‌ها داشته است. به‌طور کلی، مدل ون‌گنوختن بهترین پیش‌بینی را برای منحنی نگهداشت خاک ارائه کرده است. هم‌چنین، توانایی برآورد منحنی نگهداشت مدل ون‌گنوختن برای نفت خام بیشتر از آب بود. حال آن‌که توانایی برآورد دو مدل تجربی-لگاریتمی بروکس-کوری و کمپیل برای آب بیشتر از نفت خام بود.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که نگهداشت خاک برای نفت خام (آلاینده هیدروکربنی لزج) از آب بیشتر است. هم‌چنین مقدار پارامترهای

جدول ۲ نشان می‌دهد لزوجت سینماتیکی نفت خام حدود ۱۰ برابر آب است. در نتیجه با توجه به معادله ۱۸، هدایت هیدرولیکی اشباع محیط برای نفت خام نسبت به آب کمتر است. از طرف دیگر، با توجه به رابطه مستقیم بین لزوجت سینماتیکی و مقاومت هیدرولیکی خاک  $R_H$ ، افزایش لزوجت سینماتیکی سبب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع می‌شود. هم‌چنین شکل ۳ نشان می‌دهد که با کاهش مقدار پتانسیل ماتریک، مقدار هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و نفت خام کاهش یافته است. این کاهش هدایت هیدرولیکی برای آب بیشتر از نفت خام بود. به گونه‌ای که در پتانسیل‌های ماتریک بیشتر از ۱۰۰ سانتی‌متر آب، مقدار هدایت هیدرولیکی برای نفت خام بیشتر از آب می‌باشد. دلیل این پدیده را باید در منحنی نگهداشت خاک برای آب و NAPL جستجو کرد. با توجه به شکل ۲ در یک مکش یکسان خاک، مقدار فاز مایع در سیستم‌های دوفازی NAPL- هوا بیشتر از سیستم دوفازی آب- هوا است. در نتیجه در مکش‌های بالا، مقدار بیشتری مایع در سیستم‌های دوفازی NAPL- هوا وجود دارد و مقدار تخلخل مؤثر در جریان محیط متخلخل برای هدایت نفت خام بیشتر از آب است. به همین دلیل در پتانسیل‌های ماتریک بیشتر از ۱۰۰ سانتی‌متر آب، هدایت هیدرولیکی خاک برای نفت خام بیشتر از آب بود.

نتایج ارزیابی اعتبار مدل‌های هیدرولیکی خاک در جدول ۴ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که در سیستم‌های دوفازی آب- هوا و NAPL- هوا، مدل ون‌گنوختن کارایی بیشتری نسبت به دو مدل کمپیل و بروکس-کوری دارد.

است. نتایج اعتبار سنجی مدل‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد که کارایی مدل ون‌گنوختن در برآورد منحنی نگهداشت خاک برای نفت خام و آب بیشتر از دو مدل دیگر است. مقدار مثبت آماره CRM مدل ون‌گنوختن نشان‌دهنده کم برآوردی مدل و مقادیر CRM منفی در مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل نشان‌دهنده بیش‌برآوردی آنها است. مقدار آماره RMSE مدل ون‌گنوختن نسبت به دو مدل کمپیل و بروکس-کوری کمتر بود. به‌طورکلی، مدل ون‌گنوختن پیش‌بینی بهتری از مدل‌های نگهداشت خاک در سیستم‌های دو فاز آب-هوا و نفت خام-هوا ارائه می‌نماید.

توزیع تخلخل یا شیب منحنی ( $\lambda$ ,  $n$  و  $1/b$ ) و پارامترهای نقطه ورود هوا ( $\alpha$  و  $1/h_0$ ) مدل‌های هیدرولیکی در حضور نفت خام کاهش می‌یابد. نگهداشت خاک برای نفت خام به دلیل رفتار نامتعارف این سیال از جمله لزوجت سینماتیکی زیاد و مقدار زیاد آسفالت بیشتر از آب است. هم‌چنین، به دلیل لزوجت سینماتیکی زیاد نفت خام نسبت به آب، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای نفت خام کمتر از آب است. لیکن با افزایش مکش، هدایت هیدرولیکی غیراشباع محیط برای نفت خام از آب بیشتر می‌شود. دلیل این پدیده بیشتر بودن حجم مایع خاک در سیستم دو فاز نفت خام-هوا نسبت به سیستم دو فاز آب-هوا (در نتیجه نگهداشت بیشتر خاک برای نفت خام)

## منابع مورد استفاده

- نوری، م.، م. همایی و م. بای‌وردی. ۱۳۹۱. ارزیابی پارامتریک توانایی نگهداشت خاک در حضور نفت خام در حالت سه فاز. نشریه حفاظت منابع آب و خاک ۲(۲): ۲۴-۱۵
- Bear, J. and Cheng. A.H.-D. 2008. *Modeling groundwater flow and contaminant transport*, Springer Verlag.
- Brooks, R.H. and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers*, Colorado State University.
- Brost, E.J. and G.E. DeVauil. 2000. Non-aqueous phase liquid (NAPL) mobility limits in soil: American Petroleum Institute.
- Brutsaert, W. 1967. Some methods of calculating unsaturated permeability. *Trans. ASAE*. 10: 400-404.
- Burdine, N. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Trans. AIME*. 198: 71-78.
- Busby, R.D. Lenhard, R.J. and Rolston, D.E. 1995. An Investigation of Saturation-Capillary Pressure Relations in Two-and Three-Fluid Systems for Several NAPLS in Different Porous Media. *Ground Water*. 33(4): 570-578.
- Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci*. 117: 311-314.
- Childs, E.C. and N. Collis-George. 1950. The Permeability of Porous Materials. *Proc. R. Soc. London Ser. A*. 201: 392-405.
- Dashtaki, S.G., M. Homaei and H. Khodaverdiloo. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Manage*. 26: 68-74.
- Demond, A. H. and P.V. Roberts. 1991. Effect of interfacial forces on two-phase capillary pressure—saturation relationships. *Water Resour. Res.* 27(3): 423-437.
- Francis, C. and H. Bennet. 1922. The Surface Tension of Petroleum. *Indust. & Eng. Chem*. 14:626-627.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*: Academic Press, San Diego, CA.
- Homaei, M., C. Dirksen and R. Feddes. 2002. Simulation of root water uptake: I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agric. Water Manage*. 57: 89-109.
- Høst-Madsen, J. and K. Høgh Jensen. 1992. Laboratory and numerical investigations of immiscible multiphase flow in soil. *J. Hydrol*. 135: 13-52.
- Jackson, R.D. 1972. On the Calculation of Hydraulic Conductivity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 36:380-382.
- Jarsjö, J., G. Destouni and B. Yaron. 1994. Retention and volatilisation of kerosene: Laboratory experiments on glacial and post-glacial soils. *J. Contamin. Hydrol*. 17: 167-185.
- Khodaverdiloo, H., M. Homaei, M.T.H. van Genuchten and S.G. Dashtaki. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *J. Hydrol*. 399: 93-99.
- Leij, F.J., W.B. Russell and S.M. Lesch. 1997. Closed form expressions for water retention and conductivity data. *Ground Water* 35: 848-858.

20. Lenhard, R. and J. Parker. 1987. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: 2. Permeability-saturation relations. *Water Resour. Res.* 23: 2197-2206.
21. Lenhard, R.J.B. and R. H. Brooks. 1985. Comparison of Liquid Retention Curves with Polar and Nonpolar Liquids. *Soil Sci. Soc. of Amer. J.* 49: 816-822.
22. Leverett, M. 1941. Capillary behavior in porous media. *Trans. AIME* 142: 341-358.
23. Makó, A. 2005. Measuring the two-phase capillary pressure-saturation curves of soil samples saturated with nonpolar liquids. *Commun. in Soil Sci. and Plant Anal.* 36: 439-453.
24. Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. for Industrial and Appl. Math.* 11: 431-441.
25. Mercer, J.W. and R.M. Cohen. 1990. A review of immiscible fluids in the subsurface: Properties, models, characterization and remediation. *J. Contaminant Hydrol.* 6: 107-163.
26. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
27. Mualem, Y. 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. PP. 799-823. *In: A. Klute, (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. American Society of Agronomy, Madison, WI.*
28. Parker, J. and R. Lenhard. 1987. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: 1. Saturation-pressure relations. *Water Resour. Res.* 23: 2187-2196.
29. Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics.* 1: 318-333.
30. Sharma, R. and M. Mohamed. 2003. Patterns and mechanisms of migration of light non-aqueous phase liquid in an unsaturated sand. *Geotechnique* 53: 225-239.
31. Shirazi, M.A. and L. Boersma. 1984. A Unifying Quantitative Analysis of Soil Texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48: 142-147.
32. Streeter, V.L., E.B. Wylie and K.W. Bedford. 1998. *Fluid Mechanics.* 9<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill Pub., USA.
33. Su, C. and R. Brooks. 1976. Hydraulic functions of soils from physical experiments and their applications. Final Report Oregon State Univ., Corvallis. *Water Resources Research Inst.* 1.
34. van Genuchten, M.TH. 1978. Numerical solutions of the one-dimensional saturated-unsaturated flow equation. *Water Resour. Prog., Dep. Civ. Eng., Princeton Univ., Princeton, NJ, Res. Rep:09.*
35. van Genuchten, M.TH. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44: 892-898.
36. van Genuchten, M.TH. and D. Nielsen. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophys.* 3: 615-628.
37. Weiner, E.R. 2000. *Applications of Environmental Chemistry: A Practical Guide for Environmental Professionals.* CRC Press, USA.
38. Zarei, G., M. Homaei, A. M. Liaghat and A. H. Hoorfar. 2010. A model for soil surface evaporation based on Campbell's retention curve. *J. Hydrol.* 380: 356-361.

## Comparing Petroleum and Water Hydraulic Properties in Soil

M. Nouri, M. Homae\* and M. Bybordi<sup>1</sup>

(Received: Feb. 28-2012; Accepted: Dec. 15-2012)

### Abstract

In order to assess hydraulics of LNAPLs in soil, the soil retention curves of petroleum and water were both determined through hanging column method. And, the hydraulic conductivity of petroleum and water were determined by steady head method. The water and petroleum hydraulic conductivities were 7.27 and 57.84 cm.day<sup>-1</sup>, respectively. The soil retention parameters were obtained based on van Genuchten, Brooks-Corey and Campbell models. In addition, the soil hydraulic conductivity for both fluids was predicted based on Mualem- Brooks-Corey, Burdine- Brooks-Corey, Mualem-van Genuchten and Campbell models. The accuracy assessment of models was performed by ME, RMSE, CD, EF and CRM. The results indicated that the magnitudes of the pore-size distribution parameters and the bubbling pressure parameters were reduced in NAPL-air system compared to water-air system. Due to unusual hydraulic behavior of petroleum and soil-petroleum interactions leading to remaining substantial petroleum content in porous media, more matric potential is needed to drain out petroleum from soils compared to water. Thus, soil provides more retention for petroleum at a given quantity of fluid. Owing to high amount of petroleum kinematic viscosity, the saturated soil hydraulic conductivity of petroleum was lower than that of water. However, soil hydraulic conductivity for petroleum was larger than water at more than 100 cm matric head.

**Keywords:** Petroleum, Soil hydraulic models, Soil retention curve, Soil hydraulic conductivity

---

1. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

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