

بررسی پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در حضور آلاینده نفت سفید^۱

میلاذ نوری^۱، مهدی همایی^{۲*} و محمد بای‌بوردی^۲

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ایران

(۲) استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: mhomace@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۲۰

چکیده

ارزیابی کمی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های آلوده به مشتقات نفتی برای حفاظت بهینه از منابع آب و خاک ضروری است. هدف از این پژوهش بررسی اثر حضور نفت سفید بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بود. بدین منظور، منحنی‌های نگهداشت و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای نفت سفید و آب به ترتیب به‌وسیله‌ی دستگاه ستون آویزان و روش بار ثابت تعیین شدند. پارامترهای منحنی‌های نگهداشت خاک، برای آب و نفت سفید بر اساس مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس-کوری و کمپیل برآورد شد. هدایت هیدرولیکی غیر اشباع به عنوان تابعی از پتانسیل ماتریک خاک به‌وسیله‌ی مدل‌های معلم-ون‌گنوختن، معلم-بروکس-کوری، بوردین-بروکس-کوری و کمپیل تعیین شد. نتایج نشان داد به دلیل کشش کمتر نفت سفید، این سیال نسبت به آب با نیروی کمتری در خاک نگهداشت می‌شود. همچنین، مقدار پارامترهای توزیع تخلخل تقریباً بدون تغییر و نقطه ورود هوا در سیستم دو فاز نفت سفید-هوا نسبت به آب-هوا افزایش یافت. نسبت پتانسیل ماتریک خاک برای نفت سفید ۰/۴۸ پتانسیل ماتریک خاک برای آب در یک حجم مایع خاک یکسان بود. مقدار فاکتور مقیاسی لورت ۰/۳۹ و فاکتور مقیاسی پیشنهاد شده در این پژوهش ۰/۴۹ بود که نشان می‌دهد فاکتور مقیاسی پیشنهادی با دقت بیشتری منحنی نگهداشت سیالات را برآورد می‌کند. همچنین به دلیل لزوجت بیشتر نفت سفید و نگهداشت کمتر خاک برای این سیال، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای نفت سفید کمتر از آب بود.

واژه‌های کلیدی: فاکتور مقیاسی؛ مدل‌های هیدرولیکی خاک؛ منحنی نگهداشت خاک؛ نفت سفید

مقدمه

سینماتیکی، جرم ویژه و کشش سطحی و ویژگی‌های فیزیکی محیط از قبیل توزیع تخلخل و شیب هیدرولیکی وابسته است (Mercer and Waddel, 1993). با فرض اینکه محیط متخلخل و سیالات تراکم ناپذیر باشند و با صرف نظر از وجود منبع و مصرف^۵، حرکت سیالات در محیط‌های متخلخل از ترکیب معادلات اندازه حرکت و پیوستگی قابل توصیف است:

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

آلاینده‌های هیدروکربنی به دو گروه سیالات با چگالی کمتر از آب^۲ NAPLs و با چگالی بیشتر از آب^۳ DNAPL تقسیم می‌شوند (Weiner, 2000). تحرک و نگهداشت مواد هیدروکربنی در محیط متخلخل به ویژگی‌های فیزیکی آلاینده همچون قابلیت خیس کنندگی^۴ سیال، گرانشی

^۱ - برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ - Light Non-Aqueous phase Liquids

^۳ - Dense Non-Aqueous phase Liquids

^۴ - Wettability

^۵ - Source and sink

در معادله ۴، $\sqrt{\frac{k}{\xi}}$ نماینده طول میکروسکوپی خاک است که فقط به ویژگی‌های هندسی خاک مرتبط است. بنابراین در محیط‌های متخلخل یکسان فاکتور مقیاسی لورت به شکل زیر قابل ساده شدن است:

$$J(S_e) = \frac{h_1}{\sigma_1} = \frac{h_2}{\sigma_2} = \dots \quad (5)$$

فاکتور مقیاس‌سازی لورت توسط پژوهش‌گران زیادی برای برآورد منحنی نگهداشت جفت سیالات مورد استفاده قرار گرفته است (Fagerlund *et al.*, 2012; Høst-Madsen and Høgh Jensen, 1992; Lenhardt *et al.*, 1988; Mercer and Waddell, 1993). در مقابل بسیاری از پژوهش‌های انجام گرفته درباره صحت و دقت روش مقیاس‌سازی در برآورد منحنی نگهداشت جفت سیالات بر مبنای منحنی نگهداشت سیال مینا نشان می‌دهند که صحت فاکتور مقیاس‌سازی لورت محدود به شرایط ویژه است و در بسیاری موارد توانایی تخمین منحنی نگهداشت سیالات را ندارد. در این راستا پژوهش Roberts و Demond (1991) نشان داد که 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. درحالی‌که منحنی نگهداشت خاک به مقدار زیادی به توزیع اندازه ذرات، هندسه خلل و فرج محیط و برهمکنش‌های سیال-محیط وابسته است (Bubsy *et al.*, 1995). بنابراین با دور شدن سیستم از حالت ایده‌آل و واکنش‌ناپذیر (مانند وجود مقدار زیادی رس و یا حضور سیالات واکنش پذیر با رفتارهای غیرمعمول و پیچیده) اعتبار فاکتور مقیاسی لورت تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

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

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

که در آن‌ها k_o متخلخل خاک، S_o درصد حجمی به ترتیب آب و NAPL، K_{ro} و K_{rw} هدایت هیدرولیکی محیط برای آب و NAPL، K_{ro} و K_{rw} نفوذپذیری نسبی محیط برای آب و NAPL، h_o و h_w پتانسیل ثقلی، h_o پتانسیل ماتریک محیط برای آب و NAPL و i ، j و k به ترتیب بردارهای واحد در جهت‌های کارتزینی x ، y و z می‌باشند. رابطه فشار موینگی-حجم سیال، و هدایت هیدرولیکی-حجم سیال از پیش نیازهای حل معادله حرکت سیالات در محیط متخلخل هستند. منحنی نگهداشت خاک^۱ بیانگر رابطه بین پتانسیل ماتریک (یا فشار موینگی) و مقدار حجمی فاز مایع محیط است. منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی محیط‌های متخلخل تابع ویژگی‌های خاک و مایع خاک هستند. بنابراین با تغییر ویژگی‌های فیزیکی مایع خاک منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی نیز تغییر می‌کند (Payne *et al.*, 2008). لزوجت، کشش سطحی و زاویه تماس^۲ از ویژگی‌های مایع خاک هستند که تحت تاثیر حضور NAPLها در خاک قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های برآورد منحنی نگهداشت مواد هیدروکربنی در شرایط دو فازی و سه فازی روش مقیاس‌سازی^۳ است. در این روش منحنی نگهداشت یک جفت سیال بر مبنای داده‌های منحنی نگهداشت سیال دیگر برآورد می‌شود. Leverett (1941) با فرض تراکم ناپذیری خاک و سیال فاکتور مقیاسی خود را ارایه داده است:

$$J(S_e) = \frac{h_1}{\sigma_1} \sqrt{\frac{k_1}{\xi_1}} = \frac{h_2}{\sigma_2} \sqrt{\frac{k_2}{\xi_2}} = \dots \quad (4)$$

که در آن σ ، k و ξ به ترتیب کشش سطحی سیال، نفوذپذیری ذاتی و تخلخل کل خاک است.

¹- Soil retention curve

²- Contact angle

³- Scaling method

⁴- Soil microscopic length

مقدار پارامترهای توزیع تخلخل مدل (n و m) و پارامتر نقطه ورود هوا به خاک مدل (α) افزایش یافت، که حاکی از کاهش نگهداشت محیط متخلخل شنی برای LNAPL بود. Mako (2005) منحنی نگهداشت خاک برای NAPL‌ها را با استفاده از ویژگی‌های زود یافت مقدار ماده‌ی آلی، توزیع اندازه ذرات و مقدار کلسیم خاک برآورد کرد. او استفاده از توابع انتقالی را به جای فاکتورهای مقیاس‌سازی برای برآورد منحنی نگهداشت مشتقات نفتی پیشنهاد کرد. تاکنون تلاش‌های بسیاری برای مدل‌سازی منحنی نگهداشت خاک صورت گرفته است (Leijet al., 1997). Brooks و Corey (1964) با به‌کار بردن ماده نفتی سالترویل مدلی تجربی برای برآورد منحنی نگهداشت خاک ارائه کرده‌اند:

$$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = (\alpha h)^{-\lambda} \quad (6)$$

که در آن α پارامتر نقطه ورود هوا^۲، λ پارامتر چگونگی توزیع تخلخل^۳، S_e اشباع موثر^۴، θ_s مقدار حجمی فاز مایع خاک در حالت اشباع خاک و θ_r رطوبت باقیمانده^۵ است. Campbell (1974) نیز معادله‌ی تجربی زیر را برای پیش-بینی رابطه پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک ارائه داده است:

$$\theta = \theta_s \left(\frac{h}{h_0} \right)^{-(1/b)} \quad (7)$$

که در آن h_0 پتانسیل ماتریک خاک در نقطه ورود هوا به خاک و b پارامتر توزیع تخلخل و برابر با عکس λ (معادله ۶) است.

vanGenuchten (1980) نیز مدلی برای برآورد منحنی نگهداشت خاک پیشنهاد داده است که برای دامنه‌ی وسیعی از محیط‌های متخلخل کارایی مطلوبی ارائه نموده است:

$$S_e = (1 + (\alpha h)^n)^{-m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (8)$$

Jarsjo و همکاران (1994) منحنی نگهداشت آب و نفت سفید را برای خاک‌های رسی، شنی و آلی تعیین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در تمام مواد، محیط متخلخل نگهداشت کمتری برای نفت سفید در مقایسه با آب داشت. همچنین با افزایش ماده آلی، رس و رطوبت نگهداشت محیط برای نفت سفید افزایش می‌یابد. Reible و همکاران (1989) به مدل‌سازی انتقال و سرنوشت نفت سفید در محیط‌های غیر اشباع شنی پرداختند. Liu و همکاران (1998) منحنی نگهداشت دو خاک شنی را در سه سیستم دو فاز آب-هوا، NAPL-هوا و NAPL-آب بر مبنای روش جریان خروجی چند گامی^۱ (Gardner, 1956) تعیین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت پارامتر پتانسیل نقطه ورود هوا در مدل ون گنوختن با فاکتور مقیاس‌سازی لورت رابطه مستقیم دارد. Chen و همکاران (1999) به برآورد پارامتریک منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی دو محیط شنی در سه سیستم دو فاز آب-هوا، NAPL-هوا و NAPL-آب پرداختند. آن‌ها برای توصیف منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی از هفت مدل هیدرولیکی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پارامترهای توزیع تخلخل و نقطه ورود هوای مدل‌ها در سیستم‌های دو فاز آب-هوا و NAPL-آب، نسبت به سیستم آب-هوا بیشتر بوده است. همچنین، تغییرات پارامترهای نقطه ورود هوا نسبت به پارامترهای توزیع تخلخل بیشتر بود. به‌علاوه، مدل‌های گاردنر-معلم، ون گنوختن-معلم، بروتسارت-معلم و کوسوگی-معلم برآورد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته‌اند. Sharma و Mohamed (2003) در دامنه‌ی محدودی از پتانسیل ماتریک، منحنی‌های نگهداشت یک خاک شنی را در سیستم‌های دو فاز آب-هوا، LNAPL-آب و LNAPL-هوا مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین برای برآورد منحنی‌های نگهداشت مایع خاک در محیط‌های دو فاز از مدل ون گنوختن استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که

² -Air entry value or bubbling pressure

³ -porosity distribution parameter

⁴ -Effective saturation

⁵ -Residual Saturation

¹ - Outflow Multistep

مدل معلم (مدل ۱۱) تلفیق و نتایج حاصل از مدل‌های تلفیقی معلم-بروکس-کوری (مدل ۱۲) و معلم-ون-گنوختن (مدل ۱۳) را مقایسه کرده است:

$$K_r = S_e^{(2.5+\frac{2}{\lambda})} \quad (12)$$

$$K_r = S_e^{\ell} \{1 - [1 - S_e^m]^m\}^2 \quad (13)$$

که در آن، ℓ فاکتور درون اتصالی خاک است.

همچنین Campbell (1974) با حلمعادله Childs و Collis-George (1950)، مدل هدایت هیدرولیکی خود را به صورت زیر ارائه داد:

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{2b+2+p} \quad (14)$$

که در آن، فرض $p = 1$ نتایج مناسب‌تری برای اکثر مدل‌های خاک ارائه می‌دهد (Jackson, 1972).

با توجه به مصارف گسترده صنعتی و خانگی نفت سفید، احتمال آلوده شدن منابع خاک و آب به این سیال هیدروکربنی فراوان است. در این راستا، بررسی توانایی هدایت و نگهداشت خاک برای نفت سفید مهم و ضروری به نظر می‌رسد. به دلیل وقت‌گیر و گران بودن تعیین منحنی نگهداشت و هیدرولیکی خاک برای NAPLها، ارائه راه-کاری مناسب برای مقیاس سازی داده‌های منحنی نگهداشت سیالدر سیستم‌های دوفازی NAPL-هوا و NAPL-آب-هوا بر مبنای داده‌های نگهداشت آب-هوا ضروری است. لیکن، با توجه به ضعف‌های روش‌های مقیاسی ارائه شده، پیشنهاد روشی برای مقیاس سازی داده-های نگهداشت مورد نیاز است. از این رو، هدف از انجام این پژوهش، بررسی رفتار هیدرولیکی و نگهداشت نفت سفید و آب به وسیله‌ی خاک، و مقایسه آن‌ها با یکدیگر بود. همچنین برآورد منحنی نگهداشت خاک بوسیله‌ی مدل‌های ون-گنوختن، بروکس-کوری و کمپبل و منحنی هدایت هیدرولیکی خاک بوسیله‌ی مدل‌های معلم-بروکس-کوری، بردین-بروکس-کوری، معلم-ون-گنوختن و

که در آن m و n پارامترهای شیب منحنی نگهداشت خاک و α با عکس پتانسیل ماتریک نقطه ورود هوا به خاک متناسب است.

پژوهش‌های زیادی برای مدل‌سازی هیدرولیکی محیط‌های متخلخل انجام شده است (Leijet al., 1997; Mualem and Klute, 1986). در یکی از پژوهش‌ها، Brutsaert (1967) مدل‌های برآورد هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل را به سه دسته مدل‌های تخلخل یکنواخت^۱، تخلخل موازی^۲ و سری‌های موازی^۳ تقسیم‌بندی کرده است. Burdine (1953) با توجه به پژوهش‌های پورسل و فرضیات مدل‌های تخلخل موازی، مدل خویش را به صورت زیر ارائه داد:

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

که در آن Se^2 فاکتور پیوستگی مجاری خاک^۴ است.

Brooks و Corey (1964) با ترکیب مدل ۶ با مدل بردین، مدل برآورد هدایت هیدرولیکی بردین-بروکس-کوری (مدل ۱۰) را ارائه داده‌اند:

$$K_r = S_e^{(3+\frac{2}{\lambda})} \quad (10)$$

مدل‌های سری‌های موازی نوعی مدل تخلخل موازی هستند که در آن‌ها فرض قطع و بازاتصالی^۵ لحاظ شده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل Mualem (1976) اشاره کرد:

$$K_r = S_e^{0.5} \left[\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)} / \int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)} \right]^2 \quad (11)$$

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

vanGenuchten (1980) مدل منحنی نگهداشت ون-گنوختن (معادله ۸) و مدل بروکس-کوری (معادله ۶) را با

^۱- Uniform Pore Size Models

^۲- The Parallel Models

^۳- The Series-Parallel Models

^۴- Soil pore connectivity

^۵- Cut and rejoining theory

^۶- Inter-connectivity

ویژگی‌های فیزیکی محیط متخلخل مورد مطالعه در این پژوهش در جدول ۱ ارایه شده است. در این جدول، σ_g و d_g به ترتیب انحراف معیار هندسی و میانگین هندسی قطر ذرات خاک می‌باشند.

کمپیل و بررسی دقت پیش‌بینی مدل‌ها از دیگر اهداف این پژوهش بود. افزون بر این، در این پژوهش فاکتور مقیاسی جدیدی برای برآورد منحنی نگهداشت LNAPL-هوا بر مبنای منحنی نگهداشت آب-خاک ارایه شده است.

مواد و روش‌ها

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش

σ_g	d_g	ρ_p	ρ_b	تخلخل حجمی	رس	سیلت	شن	بافت
mm		g.cm ⁻³			%			
۱۱/۰۲	۶۲/۷	۲۶/۷	۱۰/۶	۴۸/۹	۱۰/۶	۲۶/۷	۶۲/۷	sandy loam

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) بدست آمد. بدین ترتیب رابطه پتانسیل ماتریک و مقدار حجمی مایع خاک (منحنی نگهداشت تجربی مایع خاک) حاصل شد. از روش بار پایا^۱ برای تعیین هدایت هیدرولیکی خاک برای نفت سفید و آب استفاده شد. مقدار مشخصی از خاک مورد مطالعه را درون استوانه‌ی شفاف و با ابعاد معینی ریخته و سپس برای اعمال جرم ویژه ظاهری، خاک فشرده شد. برای جلوگیری از حبس هوا و همچنین بهم خوردگی 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 خاک برای آب و نفت سفید بدست آمد.

آلاینده به‌کار رفته در این پژوهش، نفت سفید بود. این ماده هیدروکربنی اغلب به عنوان حلال، سوخت هیدروکربنی^۱ و ماده گرمابخش کارخانه‌ها و خانه‌های روستایی به‌کار می‌رود.

این ماده عمدتاً دارای حدود ۹ تا ۱۶ اتم کربن است و بیش از ۸۰ درصد از آن شامل مواد و ترکیبات آلکانی می‌باشد. ویژگی‌های فیزیکی سیالات در جدول ۲ ارایه شده است.

در این پژوهش برای رسم منحنی‌های نگهداشت آب و نفت سفید از دستگاه ستون آویزان^۲ استفاده شد. برای تعیین منحنی نگهداشت تجربی خاک، ابتدا نمونه‌های خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و برای اعمال جرم ویژه ظاهری خاک در یک استوانه فشرده شدند. سپس نمونه‌های خاک بروی صفحه سرامیکی قیف بوخنر^۳ دستگاه قرار گرفته و از زیر با مایع خیس‌کننده سیستم (نفت سفید 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، مقدار سیال خارج شده از نمونه‌خاک در یک استوانه مدرج جمع‌آوری شده و با کم کردن حجم سیال

^۱ - Kerosene-based hydrocarbon fuels

^۲ - Hanging column

^۳ - Buchner funnel

^۴ - Constant head method

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی نفت سفید بکار رفته در آزمایش

نام سیال	وزن مخصوص (g.cm ⁻³)	گرانروی دینامیکی (cp ¹)	گرانروی سینماتیکی (cst ¹)	کشش سطحی (dyne.cm ⁻¹)
نفت سفید	۰/۷۹	۱/۷۳	۲/۱۶	۲۸/۶
آب	۰/۹۷	۰/۸۹	۰/۸۹	۶۸/۶

۱- سانتی پواز، ۲- سانتی استوکس

کمتر از داده‌های مشاهده شده پیش‌بینی کرده است. اگر مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده مدل برابر باشند، CRM=0، EF=1، CD=1، RMSE=0، ME=0 است. شرح ریاضی آماره‌های ذکر شده به صورت زیر است (Homaei et al., 2002):

$$ME = \max |P_i - O_i|_{(i=1)}^n \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad (16)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (17)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (18)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (19)$$

که در آن‌ها P_i و O_i مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، \bar{O} و n نیز به ترتیب مقدار میانگین تعداد داده‌ها می‌باشند.

نتایج و بحث

شکل ۱ منحنی نگهداشت تجربی و برآورد شده بر مبنای مدل‌های هیدرولیکی در منحنی نگهداشت سیستم‌های سه فازی نفت خام-آب-هوا و دوفازی آب-هوا را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در یک مقدار فاز مایع حجمی، مقدار مکش کمتری برای زهکشی نفت سفید نسبت به آب لازم است. همان‌طور که در

منحنی نگهداشت آب و نفت سفید توسط تابع هیدرولیکی ون‌گنوختن (VG)، بروکس-کوری (BC) و کمپبل تا مکش ۱۵ بار پیش‌بینی شد. منحنی هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و نفت سفید بر مبنای مدل‌های معلم-بروکس-کوری (M-BC)، بوردین-بروکس-کوری (B-BC)، معلم-ون‌گنوختن (M-VG) و کمپبل برآورد شد.

برای بررسی آماری صحت پیش‌بینی مدل‌ها از آماره هایخطای حداکثر^۱، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا^۲، ضریب تعیین^۳، کارائی مدل^۴ و ضریب جرم باقیمانده^۵ استفاده شد. مقدار بالای ME نشانگر بدترین پیش‌بینی مدل است. مقادیر RMSE نشانگر مقدار خطایمدل در برآورد داده‌هاست (Dashtaki et al., 2010). در این پژوهش برای محاسبه RMSE از روش Marquardt (1963) استفاده شد. مقادیر CD نیز معرف نسبت بین پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده است. حد پایینی ME، RMSE و CD صفر می‌باشد. مقایسه‌ی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و متوسط مقادیر مشاهده شده توسط شاخص EF انجام گرفت. هر چه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی بهتری داشته است. شاخص CRM میل مدل به بیش‌برآوردی^۶ یا کم‌برآوردی^۷ را نشان می‌دهد (Khodaverdiloet al., 2011). مقدار CRM منفی یعنی مدل مقادیر را بیشتر و CRM مثبت یعنی مدل داده‌ها را

¹- Maximum Error

²- Root Means Square Error

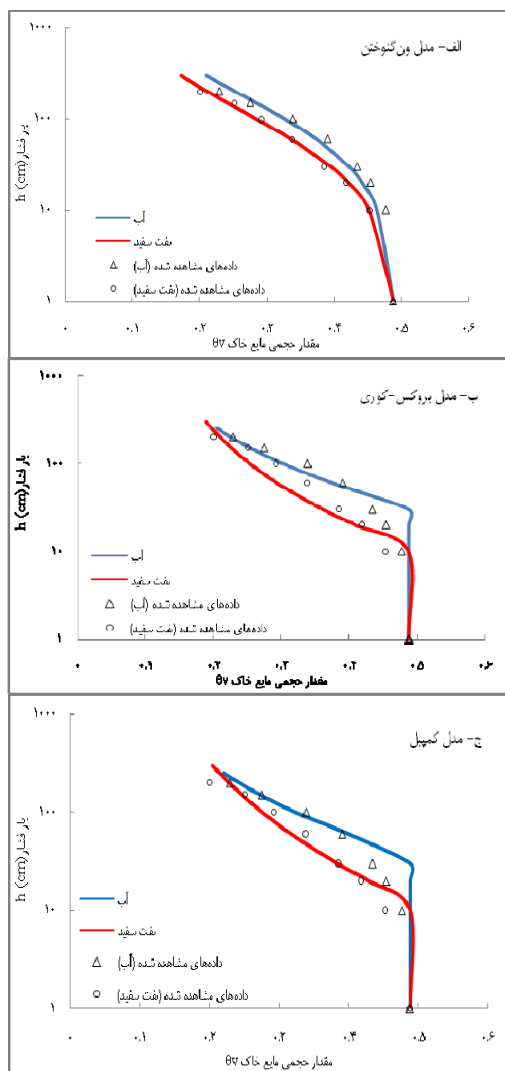
³- Coefficient of Determination

⁴- Modeling Efficiency

⁵- Coefficient of Residual Mass

⁶- Underestimate

⁷- Overestimate



شکل ۱- داده‌های اندازه‌گیری شده و منحنی‌های نگهداشت برآورد شده خاک برای آب و نفت سفید

شکل ۲ برآورد هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و نفت سفید توسط مدل‌های هدایت هیدرولیکی معلم- بروکس- کوری، بوردین- بروکس- کوری، معلم-ون‌گونختن و کمپیل را نشان می‌دهد. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای نفت سفید کمتر از آب می‌باشد.

طبق تعریف، لزوجت یا گرانروی بیانگر نیروی اصطکاک بین لایه‌های سیال در جریان می‌باشد و در حقیقت نیروی بازدارنده‌ی حرکت است (Streeter et al., 1998). بنابراین، گرانروی زیاد سیالات بیانگر اصطکاک و مقاومت بیشتر در برابر جریان می‌باشد. جدول ۲ نشان می‌دهد لزوجت مطلق نفت سفید حدود دو برابر بیشتر از آب است. در نتیجه

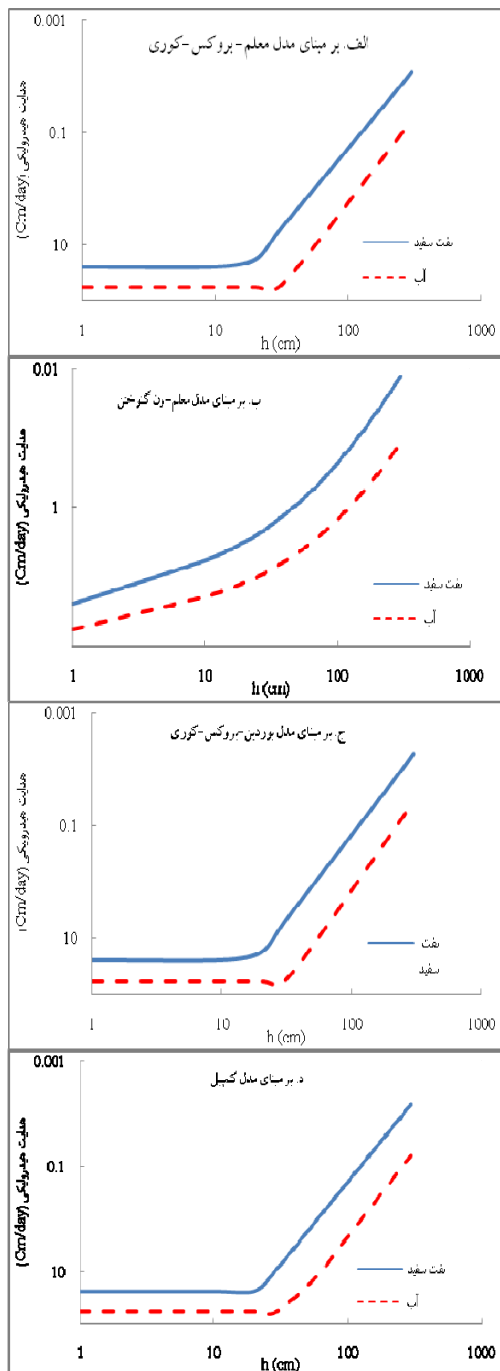
جدول ۲ قابل مشاهده است، کشش سطحی نفت سفید کمتر از مقادیر این ویژگی‌ها برای آب است. با توجه به معادله یانگ-لاپلاس^۱ ($\psi_m = \frac{-2\sigma}{r}$) و با در نظر گرفتن رابطه مستقیم کشش سطحی و پتانسیل ماتریک خاک انتظار می‌رود با کاهش کشش سطحی سیال، مقدار نگهداشت خاک برای سیال مربوطه کاهش یابد. به عبارت دیگر می‌توان چنین نتیجه گرفت که در یک مقدار مشخص از فاز مایع، مقدار کمتری نیروی مکش برای خارج کردن نفت سفید نسبت به آب لازم است. به همین دلیل منحنی نگهداشت خاک برای نفت سفید نسبت به آب در شکل ۱ پایین‌تر قرار گرفته است. جدول ۳ پارامترهای مدل‌های برازش یافته به منحنی نگهداشت تجربی نفت سفید و آب را نشان می‌دهد.

بر مبنای جدول ۳، مقدار پارامترهای توزیع خلل و فرج یا شیب منحنی (m, n, λ و $1/b$) در سیستم دو فازی نفت سفید-هوا نسبت به آب-هوا تغییر زیادی نداشته است. بنابراین شیب منحنی نگهداشت خاک در سیستم دو فازی نفت سفید-هوا و آب-هوا تقریباً بدون تغییر بوده است. به‌علاوه، مقدار پارامترهای نماینده پتانسیل ورود هوا (α) و در منحنی نگهداشت خاک برای سیستم دو فازی نفت سفید-هوا نسبت به آب-هوا افزایش داشته است.

این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای نفت سفید کمتر از آب می‌باشد. با توجه به این‌که پارامترهای نماینده پتانسیل ورود هوا با عکس نقطه ورود هوا مرتبط هستند، این افزایش نمادی از کاهش مقدار مکش ورود هوا است. این بدان معنا است که مقدار نیروی کمتری برای خارج کردن نفت سفید نسبت به آب لازم است. نتایج بررسی پارامتری این پژوهش با نتایج پژوهش‌های Jarsjo و همکاران (1994)، Liu و همکاران (1998)، Chen و همکاران (1999)، Hopmans و همکاران (1998) و Sharma و Mohamed (2003) هم‌خوانی دارد.

^۱ -Young-Laplace equation

از در نظر گرفتن زاویه تماس سیال-ذرات خاک در فاکتور مقیاسی ارایه شده صرفه نظر شده است.



شکل ۲- منحنی‌های برآورد شده پتانسیل ماتریک-هدایت هیدرولیکی خاک مورد

مطالعه برای نفت سفید و آب

نتایج ارزیابی اعتبار مدل‌های هیدرولیکی خاک در جدول ۴ ارایه شده است. این جدول نشان می‌دهد که در سیستم‌های دو فازی آب-هوا و NAPL-هوا، دو مدل کمپبل و

هدایت هیدرولیکی اشباع محیط برای نفت سفید نسبت به آب کمتر است. از طرف دیگر، با توجه به رابطه‌ی مستقیم بین لزوجت سینماتیکی و مقاومت هیدرولیکی خاک R_H ، افزایش لزوجت سینماتیکی سبب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع می‌شود. همچنین با توجه به نگهداشت کمتر خاک برای نفت سفید، در پتانسیل ماتریک یکسان مقدار مایع خاک در سیستم نفت سفید-هوا کمتر بوده‌است که این پدیده باعث کاهش تخلخل موثر در جریان خاک می‌گردد. بنابراین مقدار هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک برای آب همواره بیشتر از نفت سفید بود (شکل ۲).

با تقسیم کردن پتانسیل ماتریک خاک در منحنی نگهداشت نفت سفید بر پتانسیل ماتریک خاک در منحنی نگهداشت آب (درحجم یکسان مایع خاک) مقدار $0/48$ بدست آمد. فاکتور مقیاسی لورت (معادله ۵) با توجه به نسبت کشش سطحی نفت سفید و آب حدود $0/39$ تعیین گردید. اگر مقدار چگالی سیالات را در مقیاس‌سازی منحنی نگهداشت لحاظ کنیم، فاکتور مقیاس‌سازی به صورت زیر خواهد بود:

$$J(S_e) = \frac{\rho_1 h_1}{\sigma_1} = \frac{\rho_2 h_2}{\sigma_2} = \dots \quad (20)$$

بر اساس معادله ۲۰ و با توجه به مقادیر جرم ویژه و کشش سطحی سیالات (جدول ۲) فاکتور مقیاسی حدود $0/49$ بدست آمد.

این مقدار نسبت به فاکتور مقیاسی لورت، $0/39$ ، به مقدار حقیقی نسبت پتانسیل ماتریک خاک در منحنی نگهداشت نفت سفید بر پتانسیل ماتریک خاک در منحنی نگهداشت آب، $0/48$ ، نزدیک‌تر است.

بنابراین فاکتور مقیاسی پیشنهادی (معادله ۲۰) منحنی نگهداشت سیالات را با دقت بیشتری بر اساس منحنی نگهداشت سیال مینا برآورد می‌کند. همچنین با توجه به مفهوم زاویه تماس پویا^۱ (Tropea et al., 2003)، ناصافی دیواره مجاری خاک و ناهمگونی جنس ذرات جامد خاک

^۱ - Dynamic contact angle

نفت سفید افزایش می‌یابد. به دلیل لزوجت سینماتیکی بیشتر نفت سفید نسبت به آب و نگهداشت کمتر نفت سفید در محیط، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای نفت سفید کمتر از آب است. مقدار نسبت داده‌های پتانسیل ماتریک منحنی نگهداشت نفت سفید به پتانسیل ماتریک منحنی نگهداشت آب در حجم یکسان از مایع خاک، $0/48$ بود. همچنین فاکتور مقیاسی لورت $0/39$ و فاکتور مقیاسی پیشنهادی $0/49$ تعیین شد. بنابراین فاکتور مقیاسی پیشنهادی با در نظر گرفتن چگالی سیالات می‌تواند با دقت بیشتری منحنی نگهداشت سیالات را برآورد کند. نتایج اعتبار سنجی مدل‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد که کارایی مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل در برآورد منحنی نگهداشت خاک برای نفت سفید و آب کمتر از مدل ون گنوختن است. مقدار مثبت آماره‌ی CRM مدل ون گنوختن نشان‌دهنده‌ی کم‌برآوردی مدل و مقادیر CRM منفی در مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل نشان دهنده‌ی بیش-برآوردی آن‌ها است. مقدار آماره RMSE مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل نسبت به دو مدل ون گنوختن بیشتر بود. به‌طور کلی، مدل ون گنوختن برآورد بهتر و دقیق‌تری از نگهداشت خاک در سیستم‌های دو فازی نفت سفید-هوا ارائه می‌نمایند.

فهرست منابع

- Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Papers, Colorado State University, 24 p.
- Brutsaert, W. 1967. Some methods of calculating unsaturated permeability. Trans. ASAE, 10(3): 400-404.
- Burdine, N. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. Trans. AIME, 198(1): 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 33:570-578.
- Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Science 117:311-314.

بروکس-کوری کارایی کمتری نسبت به مدل ون گنوختن دارند. بنابراین مدل ون گنوختن کارایی بیشتری برای پیش-بینی منحنی نگهداشت هر دو سیال آب و نفت سفید داشته است. همچنین کارایی و دقت هر سه مدل ون گنوختن، بروکس-کوری و کمپیل در برآورد منحنی نگهداشت نفت سفید بیشتر از آب بوده است. 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^۱ در نقطه ورود هوا به خاک سبب می‌شود که مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل داده‌های منحنی نگهداشت خاک را پیش برآورد کنند (شکل‌های ۱.ب و ۱.ج). مقادیر CRM منفی در مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل نشان دهنده‌ی بیش برآوردی مدل‌ها است. ناپیوستگی مذکور در منحنی نگهداشت برآورد شده بر مبنای مدل ون گنوختن دیده نمی‌شود. به عبارت دیگر نگاه مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل به فرآیند ورود هوا به خاک به صورت نقطه‌ی و دیدگاه مدل ون گنوختن به صورت فرآیندی تدریجی می‌باشد. بنابراین بیش برآوردی مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل در ناحیه ورود هوا به خاک در مدل ون گنوختن دیده نمی‌شود (شکل ۱.الف). مقادیر CRM مثبت در مدل ون گنوختن نشان‌دهنده‌ی کم-برآوردی مدل ون گنوختن است. به‌علاوه، مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل RMSE کمتری نسبت به مدل ون گنوختن داشته‌اند. به‌طور کلی، مدل ون گنوختن بهترین پیش‌بینی را برای منحنی نگهداشت آب و نفت سفید ارائه کرده است.

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی پارامتریک نگهداشت نفت سفید و آب در خاک نشان داد که به دلیل کشش سطحی کمتر نفت سفید نسبت به آب، نگهداشت خاک برای نفت سفید از آب کمتر است. همچنین مقدار پارامترهای توزیع تخلخل یا شیب منحنی $(\lambda, n, 1/b)$ تقریباً بودن تغییر و پارامترهای نقطه ورود هوا $(\alpha$ و $1/h_0)$ مدل‌های هیدرولیکی در حضور

^۱-Discontinuity

- Khodaverdiloo, H. Homae, M., van Genuchten, M.Th. and Dashtaki, S.G. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399(1-2): 93-99.
- Leij, F.J., Russell, W.B. and Lesch, S.M. 1997. Closed form expressions for water retention and conductivity data. *Ground Water*, 35(5): 848-858.
- Lenhard, R., Dane, J., Parker, J. and Kaluarachchi, J. 1988. Measurement and simulation of one-dimensional transient three-phase flow for monotonic liquid drainage. *Water Resources Research*, 24(6): 853-863.
- Leverett, M. 1941. Capillary behavior in porous media. *Trans. AIME*, 142: 341-358.
- Liu, Y., Hopmans, J., Grismer, M. and Chen, J. 1998. Direct estimation of air-oil and oil-water capillary pressure and permeability relations from multi-step outflow experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*, 32(3): 223-245.
- Makó, A. 2005. Measuring the two-phase capillary pressure-saturation curves of soil samples saturated with nonpolar liquids. *Communications in soil science and plant analysis*, 36(4-6): 439-453.
- Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2): 431-441.
- Mercer, J. and Waddell, D. 1993. Contaminant transport in groundwater. In Maidment, D. R. (ed). *Handbook of hydrology*. McCraw-Hill, New York, N.Y.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3): 513-522.
- Mualem, Y. and Klute, A. 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*: 799-823.
- 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.
- Payne, F., Quinnan, J. and Potter, S. 2008. *Remediation Hydraulics*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Reible, D.D., Malhiet Tissa, H. and Mark, E. 1989. Modeling gasoline fate and transport in the unsaturated zone. *Journal of hazardous materials*, 22(3): 359-376.
- Sharma, R. and Mohamed, M. 2003. Patterns and mechanisms of migration of light non-aqueous
- Chen, J., Hopmans, J. and Grismer, M. 1999. Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability functions. *Advances in Water Resources*, 22(5): 479-493.
- Childs, E.C. and Collis-George, N. 1950. The permeability of porous materials. *Proceedings of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 201(1066): 392-405.
- Dashtaki, S.G., Homae, M. and Khodaverdiloo, H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26(1): 68-74.
- Demond, A.H. and Roberts, P.V. 1991. Effect of interfacial forces on two-phase capillary pressure-saturation relationships. *Water Resources Research*, 27(3): 423-437.
- EPA. 1989. Laboratory investigation of residual liquid organics from spills, leaks, and the disposal of hazardous wastes in ground water. Final report, April 1986-August 1989, New Mexico Inst. of Mining and Technology, Socorro, NM, USA.
- Fagerlund, F., Illangasekare, T. Phenrat, T., Kim, H.J. and Lowry, G. 2012. PCE dissolution and simultaneous dechlorination by nanoscale zero-valent iron particles in a DNAPL source zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, 131(1): 9-28.
- Gardner, W. 1956. Calculation of Capillary Conductivity from Pressure Plate Outflow Data. *Soil Science Society of America Journal*, 20(3): 317-320.
- 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.
- Hopmans, J.W., Grismer, M.E., Chen, J. and Liu, Y. 1998. Parameter estimation of two-fluid capillary pressure saturation and permeability functions. US Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, 14 p.
- Høst-Madsen, J. and Høgh Jensen, K. 1992. Laboratory and numerical investigations of immiscible multiphase flow in soil. *Journal of Hydrology*, 135(1-4): 13-52.
- Jackson, R.D. 1972. On the Calculation of Hydraulic Conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 36(2): 380-382.
- Jarsjö, J., Destouni, G. and Yaron, B. 1994. Retention and volatilisation of kerosene: Laboratory experiments on glacial and post-glacial soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 17(2): 167-185.

- of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J 44:892-898.
- Weiner, E.R. 2000. Application of environmental chemistry: a practical guide for environmental professionals. CRC press.288 p.
- phase liquid in an unsaturated sand. Geotechnique, 53(2): 225-239.
- Streeter, V.L., Wylie, E.B. and Bedford, K.W. 1998. Fluid mechanics, 9th ed. McGraw-Hill, 569 p.
- Tropea, C., Yarin, A.L. and Foss, J.F. 2007. Springer handbook of experimental fluid mechanics, 1. Springer, 1240 p.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity



ISSN 2251-7480

Parametric assessment of soil hydraulic functions at presence of Kerosene contaminant

Milad Nouri¹, Mehdi Homaei^{2*} and Mohammed Bybordi²

1) M.Sc. Student, Department of Soil Science, Tarbiat Modares University, Tehran 14115-336, Iran.

2) Professor, Department of Soil Science, Tarbiat Modares University, Tehran 14115-336, Iran

*corresponding author email: mhomaei@modares.ac.ir

Received: 11-05-2012

Accepted: 11-09-2012

Abstract

Quantitative assessment of soils hydraulic properties that are contaminated with oils is crucial for optimal soil and water resources conservation. The objective of this study was to investigate Kerosene effect on soil hydraulic properties. For this purpose, the soil retention curves and saturated hydraulic conductivity of Kerosene and water were determined by hanging column and constant head method, respectively. The soil retention curve parameters were obtained based on van Genuchten, Brooks-Corey and Campbell's models. Unsaturated soil hydraulic conductivity for both fluids were predicted based on Mualem- Brooks-Corey, Burdine- Brooks-Corey, Mualem-van Genuchten and Campbell's functions. The results indicated that Kerosene was retained less than water owing to its negligible surface tension, yielding less needed tension to drain kerosene out from soils. Moreover, the magnitudes of the pore-size distribution parameters remained mostly unchanged and the bubbling pressure parameters were increased in Kerosene-air system compares to water-air system. The Kerosene-water matric potential ratio at the same soil fluid quantity was 0.48. The Leverett's and suggested scale factors were determined 0.39 and 0.49, respectively, which indicates the soil fluid retention curves were appropriately scaled based on the recommended scale factor. Due to high kinematic viscosity of Kerosene and low soil retention for Kerosene, the saturated and unsaturated soil hydraulic conductivity of Kerosene was less than that of water.

Keywords: Kerosene; scaling factor; soil hydraulic models; soil retention curve