

## بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در حضور سوخت دیزل در شرایط دوفازی

میلاذ نوری<sup>۱</sup>، مهدی همایی<sup>۲\*</sup>، محمد بای‌بوردی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس

۲ و ۳. استاد گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۱۱/۱۴)

### چکیده

به منظور بررسی اثر حضور سوخت دیزل بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک منحنی‌های نگه‌داشت خاک برای سوخت دیزل و آب به وسیله دستگاه ستون‌آویزان به دست آمد. پارامترهای منحنی‌های نگه‌داشت خاک برای آب و سوخت دیزل بر اساس مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس-کوری، و کمپیل برآورد شد. هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، به منزله تابعی از پتانسیل ماتریک خاک به وسیله مدل‌های معلم-ون-گنوختن، معلم-بروکس-کوری، بوردین-بروکس-کوری، و کمپیل تعیین شد. مقدار پارامترهای توزیع تخلخل تقریباً بدون تغییر و نقطه ورود هوا در سیستم دوفازی سوخت دیزل-هوا نسبت به آب-هوا افزایش یافت. نتایج نشان داد، به دلیل کشش سطحی کمتر سوخت دیزل، این سیال در مقایسه با آب با نیروی کمتری در خاک نگه‌داشته می‌شود. فاکتور مقیاسی لورت با دقتی مناسب منحنی نگه‌داشت سوخت دیزل را برآورد کرد. همچنین، به دلیل لزوجت بیشتر سوخت دیزل و نگه‌داشت کمتر خاک برای این سیال، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای سوخت دیزل کمتر از آب بود.

**کلیدواژگان:** سوخت دیزل، فاکتور مقیاسی لورت، مدل‌های هیدرولیکی خاک، نگه‌داشت خاک، هدایت هیدرولیکی خاک.

### مقدمه

آلاینده‌های هیدروکربنی به دو گروه سیالات با چگالی کمتر از آب (LNAPLs)<sup>۱</sup> و با چگالی بیشتر از آب (DNAPL)<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند (Weiner, 2000). تحرک و نگه‌داشت مواد هیدروکربنی در محیط متخلخل به ویژگی‌های فیزیکی آلاینده-همچون قابلیت خیس‌کنندگی<sup>۳</sup> سیال، گرانروی سینماتیکی، جرم ویژه، کشش سطحی- و ویژگی‌های فیزیکی محیط- همچون توزیع تخلخل و شیب هیدرولیکی- وابسته است (Mercer and Waddell, 1993). با فرض اینکه محیط متخلخل و سیالات تراکم‌ناپذیر باشند و صرف نظر از وجود منبع و مصرف<sup>۴</sup>، حرکت سیالات در محیط‌های متخلخل از ترکیب معادلات اندازه حرکت و پیوستگی قابل توصیف است:

$$\xi \left( \frac{\partial S_w}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \{ (K_{rw} k_w (\nabla h_w + \nabla z)) \} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\xi \left( \frac{\partial S_o}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \{ (K_{ro} k_o (\nabla h_o + \nabla z)) \} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) i + \left( \frac{\partial}{\partial y} \right) j + \left( \frac{\partial}{\partial z} \right) k \quad (\text{رابطه ۳})$$

$\xi$  تخلخل خاک،  $S_w$  و  $S_o$  درصد حجمی به ترتیب آب و NAPL،  $K_w$  و  $K_o$  هدایت هیدرولیکی محیط برای آب و NAPL،  $K_{rw}$  و  $K_{ro}$  نفوذپذیری نسبی محیط برای آب و NAPL،  $z$  پتانسیل ثقلی،  $h_w$  و  $h_o$  بار فشار موینگی<sup>۵</sup> محیط برای آب و NAPL،  $i$  و  $j$  و  $k$  به ترتیب بردارهای واحد در جهت‌های کارترینی  $x$  و  $y$  و  $z$  هستند.

رابطه فشار موینگی- حجم سیال و هدایت هیدرولیکی- حجم سیال از پیش‌نیازهای حل معادله حرکت سیالات در محیط متخلخل است. منحنی نگه‌داشت خاک<sup>۶</sup> بیانگر رابطه پتانسیل ماتریک (بار فشار موینگی) و مقدار حجمی فاز مایع محیط است. منحنی نگه‌داشت و هدایت هیدرولیکی محیط‌های متخلخل تابع ویژگی‌های خاک و مایع خاک است. بنابراین با تغییر ویژگی‌های فیزیکی مایع خاک منحنی نگه‌داشت و هدایت هیدرولیکی نیز تغییر می‌کند. لزوجت، کشش سطحی، و زاویه تماس<sup>۷</sup> از ویژگی‌های مایع خاک است که تحت تأثیر حضور NAPLها در خاک قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های شناخته‌شده برای برآورد منحنی نگه‌داشت مواد هیدروکربنی در شرایط دوفازی و سه‌فازی روش مقیاس‌سازی<sup>۸</sup> است. در این روش

\* نویسنده مسئول: mhomaee@modares.ac.ir

5. Capillary pressure head  
6. Soil retention curve  
7. Contact angle  
8. Scaling method

1. Light Non-Aqueous phase Liquids  
2. Dense Non-Aqueous phase Liquids  
3. Wettability  
4. Source and sink

Jarsjö *et al* (1994) منحنی نگاهداشت آب و سوخت دیزل را برای خاک‌های رسی، شنی، و آلی تعیین کردند. نتایج نشان داد در همه مواد محیط متخلخل نگاهداشت کمتری برای سوخت دیزل در مقایسه با آب دارد. همچنین با افزایش ماده آلی و رس و رطوبت نگاهداشت محیط برای سوخت دیزل افزایش می‌یابد. Liu *et al* (1998) منحنی نگاهداشت دو خاک شنی را در سه سیستم دوفازی آب- هوا و NAPL- هوا و NAPL- آب بر مبنای روش جریان خروجی چندگامی<sup>۲</sup> تعیین کردند. نتایج نشان داد نسبت پارامتر پتانسیل نقطه ورود هوای مدل ون‌گنوختن با فاکتور مقیاس‌سازی لورت رابطه مستقیم دارد. Chen *et al* (1999) به برآورد پارامتریک منحنی نگاهداشت و هدایت هیدرولیکی دو محیط شنی در سه سیستم دوفازی آب- هوا و NAPL- هوا و NAPL- آب پرداختند. آن‌ها برای توصیف منحنی نگاهداشت و هدایت هیدرولیکی از هفت مدل هیدرولیکی استفاده کردند. نتایج نشان داد پارامترهای توزیع تخلخل و نقطه ورود هوای مدل‌ها در سیستم‌های دوفازی NAPL- هوا و NAPL- آب در مقایسه با سیستم آب- هوا بیشتر است. همچنین، تغییرات پارامترهای نقطه ورود هوا نسبت به پارامترهای توزیع تخلخل بیشتر است. به علاوه، مدل‌های گاردنر- معلم، ون‌گنوختن- معلم، بروتسارت- معلم، و کوسوگی- معلم در مقایسه با سایر مدل‌ها برآورد بهتری دارند. Sharma and Mohamed (2003) در دامنه محدودی از پتانسیل ماتریک منحنی‌های نگاهداشت یک خاک شنی را در سیستم‌های دوفازی آب- هوا، LNAPL- آب، و LNAPL- هوا بررسی کردند. آن‌ها همچنین برای برآورد منحنی‌های نگاهداشت مایع خاک در محیط‌های دوفازی از مدل ون‌گنوختن استفاده کردند. نتایج نشان داد مقدار پارامترهای توزیع تخلخل مدل (n و m) و پارامتر نقطه ورود هوا به خاک مدل ( $\alpha$ ) افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش نگاهداشت محیط متخلخل شنی برای LNAPL است. Mako (2005) منحنی نگاهداشت خاک برای NAPL‌ها را با استفاده از ویژگی‌های زود یافت مقدار ماده آلی و توزیع اندازه ذرات و مقدار کلسیم خاک برآورد کرد. او استفاده از توابع انتقالی را به جای فاکتورهای مقیاس‌سازی برای برآورد منحنی نگاهداشت مشتقات نفتی پیشنهاد داد.

تاکنون تلاش‌های بسیاری برای مدل‌سازی منحنی نگاهداشت خاک صورت گرفته است (Leij *et al*, 1997). Brooks and Corey (1966) با به‌کاربردن ماده نفتی سالترول<sup>۳</sup> مدلی تجربی برای برآورد منحنی نگاهداشت خاک ارائه کردند:

منحنی نگاهداشت یک جفت سیال بر مبنای داده‌های منحنی نگاهداشت سیال دیگر برآورد می‌شود. Leverett (1941) با فرض تراکم‌ناپذیری خاک و سیال فاکتور مقیاسی خود را ارائه کرد:

$$J(S_e) = \frac{h_1}{\sigma_1} \sqrt{\frac{k_1}{\xi_1}} = \frac{h_2}{\sigma_2} \sqrt{\frac{k_2}{\xi_2}} = \dots \quad (\text{رابطه ۴})$$

$\sigma$  و  $k$  و  $\xi$  به ترتیب کشش سطحی سیال و نفوذپذیری ذاتی و تخلخل کل خاک است.

در رابطه ۴  $\sqrt{\frac{k}{\xi}}$  نماینده طول میکروسکوپی<sup>۱</sup> خاک

است که با ویژگی‌های هندسی خاک ارتباط دارد. بنابراین در محیط‌های متخلخل یکسان فاکتور مقیاسی لورت به شکل زیر ساده می‌شود:

$$J(S_e) = \frac{h_1}{\sigma_1} = \frac{h_2}{\sigma_2} = \dots \quad (\text{رابطه ۵})$$

فاکتور مقیاس‌سازی لورت را بسیاری از پژوهشگران برای برآورد منحنی نگاهداشت جفت سیالات به‌کار برده‌اند (Fagrlund ; Høst-Madsen and Høgh Jensen, 1992 *et al*, 2012; ; Parker and Lenhard, 1987; Lenhard and Parker, 1988 ; Nouri *et al*, 2012 a; Nouri *et al*, 2012 b). در مقابل بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده درباره صحت و دقت روش مقیاس‌سازی نشان می‌دهد صحت فاکتور مقیاس‌سازی لورت محدود به شرایط ویژه‌ای است و در بسیاری موارد توانایی تخمین منحنی نگاهداشت سیالات را ندارد. در این زمینه پژوهش Demond and Robert (1991) نشان داد فاکتور مقیاسی لورت به دلیل در نظر نگرفتن اثر چگالی و زاویه تماس سیال- محیط متخلخل بر منحنی نگاهداشت خاک در همه موارد قادر به برآورد منحنی نگاهداشت خاک نیست. مشکل اساسی دیگر فاکتور مقیاسی لورت عدم توجه به برهمکنش‌های سیال- محیط است. به عبارت دیگر، در روش مقیاسی لورت فقط ویژگی‌های سیال در نظر گرفته شده و به ویژگی‌های هندسی خاک توجه نشده است؛ در حالی که منحنی نگاهداشت خاک به توزیع اندازه ذرات و هندسه خلل و فرج محیط و برهمکنش‌های سیال- آب بسیار وابسته است (Busby *et al*, 1995). همچنین Nouri *et al* (2014) در طی پژوهشی نتیجه گرفتند فاکتور مقیاس‌سازی لورت برای برآورد منحنی نگاهداشت نفت خام بر مبنای سیال پایه نامناسب است. بنابراین با دور شدن سیستم از حالت ایده‌آل و واکنش‌ناپذیر، مانند وجود مقدار زیادی رس یا حضور سیالات واکنش‌پذیر با رفتارهای غیر معمول و پیچیده مثل نفت خام، اعتبار فاکتور مقیاسی لورت تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

2. Multi-step outflow  
3. Soltrol

1. Soil microscopic length

$$K_r = S_e^{(2.5 + \frac{2}{\lambda})} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$K_r = S_e^{\ell} \{1 - [1 - S_e^{\frac{1}{m}}]^m\}^2 \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$\ell$  فاکتور درون اتصالی<sup>۴</sup> خاک است.

همچنین Campbell (1974) با حل معادله Childs and Collis-George (1950) مدل هدایت هیدرولیکی خود را به صورت زیر ارائه داد:

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{2b+2+p} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

فرض  $p=1$  برای بیشتر نمونه‌های خاک نتایج مناسب‌تری ارائه می‌دهد (Jackson, 1972).

هدف این پژوهش بررسی رفتار هیدرولیکی و نگاهداشت سوخت دیزل<sup>۵</sup> به‌منزله LNAPL و آب به‌وسیله خاک و مقایسه آنها با یک‌دیگر بود. برآورد منحنی نگاهداشت خاک به‌وسیله مدل‌های ون‌گنوختن و بروکس-کوری و کمپبل و منحنی هدایت هیدرولیکی خاک به‌وسیله مدل‌های معلم-بروکس-کوری و بوردین-بروکس-کوری و معلم-ون‌گنوختن و کمپبل و بررسی دقت پیش‌بینی مدل‌ها از دیگر اهداف این پژوهش بود. به‌علاوه در این پژوهش منحنی نگاهداشت LNAPL- هوا بر مبنای منحنی نگاهداشت آب خاک و از طریق تابع لورت مقیاس‌سازی شد.

### مواد و روش‌ها

برخی ویژگی‌های خاک آزمایش‌شده در جدول ۱ می‌آید. در این جدول پارامترهای فیزیکی  $\sigma_g$  و  $d_g$  به‌ترتیب انحراف معیار هندسی و میانگین هندسی قطر ذرات خاک است.

آلاینده به‌کاررفته در این پژوهش سوخت دیزل بود. این ماده هیدروکربنی اغلب برای سوخت وسایل نقلیه سنگین و همچنین ماده گرمابخش مراکز صنعتی و کشاورزی به‌کار می‌رود. ویژگی‌های فیزیکی سیالات در جدول ۲ می‌آید.

در این پژوهش برای رسم منحنی‌های نگاهداشت آب و سوخت دیزل برای خاک از دستگاه ستون‌آویزان<sup>۶</sup> استفاده شد. برای تعیین منحنی نگاهداشت تجربی خاک، ابتدا نمونه‌های خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و برای اعمال جرم ویژه ظاهری خاک در یک استوانه فشرده شد. سپس نمونه‌های خاک روی صفحه<sup>۷</sup> سرامیکی قیف بوختر<sup>۷</sup> دستگاه قرار گرفت و از زیر با مایع خیس‌کننده سیستم (سوخت دیزل یا آب) اشباع

$$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) = (\alpha h)^{-\lambda} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$\alpha$  پارامتر نقطه ورود هوا<sup>۱</sup>،  $\lambda$  پارامتر چگونگی توزیع تخلخل،  $S_e$  اشباع مؤثر،  $\theta_s$  مقدار حجمی فاز مایع خاک در حالت اشباع خاک، و  $\theta_r$  رطوبت باقی‌مانده<sup>۲</sup> است.

Campbell (1974) نیز معادله تجربی زیر را برای پیش‌بینی رابطه پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک ارائه کرد:

$$\theta = \theta_s \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-(1/b)} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$h_0$  پتانسیل ماتریک خاک در نقطه ورود هوا به خاک و  $b$  پارامتر توزیع تخلخل و برابر با عکس  $\lambda$  (رابطه ۶) است.

van Genuchten (1980) نیز مدلی برای برآورد منحنی نگاهداشت خاک ارائه کرد که برای دامنه وسیعی از محیط‌های متخلخل کارایی مطلوبی دارد:

$$S_e = (1 + (\alpha h)^n)^{-m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$n$  و  $m$  پارامترهای شیب منحنی نگاهداشت خاک و  $\alpha$  با عکس پتانسیل ماتریک نقطه ورود هوا به خاک متناسب است.

پژوهش‌های بسیاری برای مدل‌سازی هیدرولیکی محیط‌های متخلخل انجام شده است (Mualem, 1992). Burdine (1953) مدل خویش را به صورت زیر ارائه داد:

$$K_r = S_e^2 \left[ \int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)^2} / \int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)^2} \right] \quad (\text{رابطه ۹})$$

$S_e^2$  فاکتور پیوستگی مجاری خاک<sup>۳</sup> است.

بروکس و کوری با ترکیب رابطه ۶ با معادله بوردین معادله برآورد هدایت هیدرولیکی بوردین-بروکس-کوری (رابطه ۱۰) را ارائه کردند:

$$K_r = S_e^{(3 + \frac{2}{\lambda})} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

مدل Mualem (1976) به صورت زیر است:

$$K_r = S_e^{0.5} \left[ \int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)} / \int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)} \right]^2 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در مدل معلم پارامتر بازاتصالی منافذ خاک برابر ۰/۵ است. ون‌گنوختن مدل منحنی نگاهداشت ون‌گنوختن (رابطه ۸) و مدل بروکس-کوری (رابطه ۶) را با مدل معلم تلفیق و نتایج مدل‌های تلفیقی معلم-بروکس-کوری (رابطه ۱۲) و معلم-ون‌گنوختن (رابطه ۱۳) را مقایسه کرد:

4. Inter-connectivity  
5. Diesel fuel  
6. Hanging column  
7. Buchner funnel

1. Air entry value or bubbling pressure  
2. Residual Saturation  
3. Soil pore connectivity

مقدار حجمی مایع خاک محاسبه شد. مقدار پتانسیل ماتریک مایع خاک نیز با محاسبه اختلاف سطح مایع خیس کننده در شاخه آزاد و نمونه های خاک (h) به دست آمد. بدین ترتیب رابطه پتانسیل ماتریک و مقدار حجمی مایع خاک (منحنی نگاهداشت تجربی مایع خاک) حاصل شد.

شد. با تنظیم ارتفاع سطح مایع خیس کننده در شاخه آزاد دستگاه از نمونه خاک (h)، نمونه های خاک تحت مکش های مشخصی قرار گرفت. فرایند اعمال مکش تا ۲۷۰ سانتی متر آب ادامه یافت. در هر مرحله از اعمال مکش، مقدار سیال خارج شده از نمونه خاک در یک استوانه مدرج جمع آوری شد و با کم کردن حجم سیال خارج شده از حجم مایع خاک قبل از اعمال مکش،

جدول ۱. ویژگی های فیزیکی خاک استفاده شده در آزمایش

بافت	شن	سیلت	رس	تخلخل حجمی	$\rho_b$	$\rho_p$	$d_g$	$\sigma_g$
			%		$g.cm^{-3}$		mm	
sandy loam	۶۲٫۷	۲۶٫۷	۱۰٫۶	۴۸٫۸	۱٫۲۹	۲٫۵۲	۰٫۱۸	۱۱٫۰۲

جدول ۲. ویژگی های فیزیکی ماده هیدروکربنی به کاررفته در آزمایش

نام سیال	وزن مخصوص	گرانروی سینماتیکی	گرانروی دینامیکی	کشش سطحی
	$g.cm^{-3}$	cst <sup>۳</sup>	cp <sup>الف</sup>	dyne/cm
سوخت دیزل	۰٫۸۳	۲٫۲۵ <sup>۳</sup>	۲٫۷۱	۲۵٫۲ <sup>۳</sup>
آب	۰٫۹۷۷	۰٫۸۹۷ <sup>۴</sup>	۰٫۸۹۴۴	۶۸٫۶ <sup>۴</sup>

(الف) سانتی پواز (ب) سانتی استوکس

مدل<sup>۵</sup>، و ضریب جرم باقی مانده<sup>۶</sup> استفاده شد (Homaei et al, 2002). مقادیر RMSE بالا نشان می دهد چه مقدار پیش بینی ها دست پایین<sup>۷</sup> یا دست بالا<sup>۸</sup> بوده اند (Zarei et al, 2010). در این پژوهش برای محاسبه RMSE از روش Marquardt (1963) استفاده شد. مقادیر CD نیز معرف نسبت بین پراکندگی مقادیر پیش بینی شده و مقادیر اندازه گیری شده است. هر چه مقدار EF به ۱ نزدیک تر باشد مدل پیش بینی بهتری دارد (Khodaverdiloo et al, 2011). شاخص CRM میل مدل را به پیش بینی دست بالا یا دست پایین 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 (Homaei et al, 2002):

$$ME = \text{Max} |P_i - O_i|_{(i=1)}^n \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

از روش بار پایا<sup>۱</sup> برای تعیین هدایت هیدرولیکی خاک برای سوخت دیزل و آب استفاده شد. مقدار مشخصی از خاک مورد مطالعه درون استوانه ای شفاف با ابعادی معین ریخته شد و سپس، برای اعمال جرم ویژه ظاهری، خاک فشرده شد. برای جلوگیری از حبس هوا و همچنین به هم خوردگی سطح خاک در اثر تلاطم جریان، جریان سیالات به خاک از پایین به بالا برقرار شد. همچنین با قراردادن گلوله های شیشه ای 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 زمانی مشخص محاسبه شد. سپس با حل معادله دارسی مقدار هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و سوخت دیزل به دست آمد.

منحنی نگاهداشت آب و سوخت دیزل با تابع هیدرولیکی ون گنوختن (VG)، بروکس- کوری (BC)، و کمپیل تا مکش ۱۵ بار پیش بینی شد. منحنی هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و سوخت دیزل بر مبنای مدل های معلم- بروکس- کوری (M-BC)، بوردین- بروکس- کوری (B-BC)، معلم- ون گنوختن (M-VG)، و کمپیل برآورد شد.

برای بررسی دقت پیش بینی مدل ها از آماره های خطای حداکثر<sup>۱</sup>، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup>، ضریب تبیین<sup>۳</sup>، کارایی

5. Modeling Efficiency  
6. Coefficient of Residual Mass  
7. Underestimate  
8. Overestimate

1. Constant Head Method  
2. Maximum Error  
3. Root Means Square Error  
4. Coefficient of Determination

Sharma and و (1999) Chen *et al.*, (1998) Hopmans *et al* Mohamed (2003) همخوانی دارد. شکل ۲ برآورد هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و سوخت دیزل با مدل های هدایت هیدرولیکی معلم- بروکس- کوری، بوردین- بروکس- کوری، معلم- ون گنوختن، و کمپیل را نشان می دهند. بررسی این نتایج نشان می دهد مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای سوخت دیزل کمتر از آب است.

$$CD = \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 / \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2 \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$\quad (\text{رابطه ۱۸})$$

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

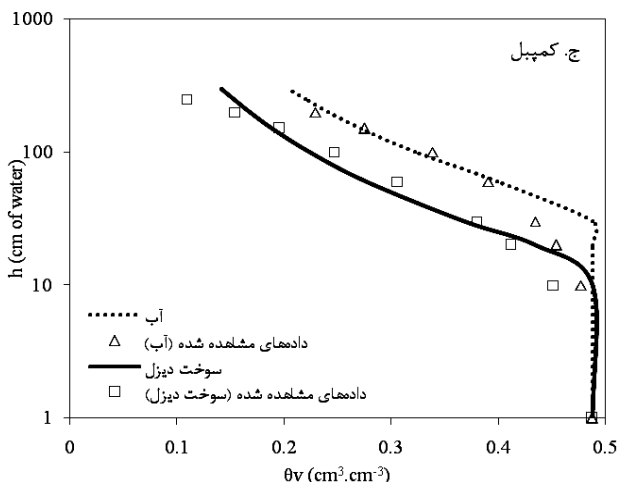
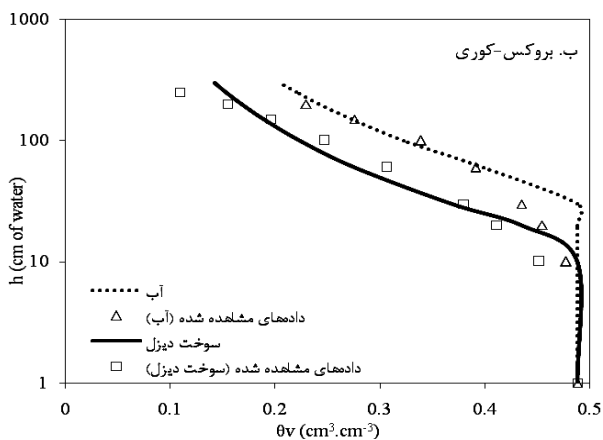
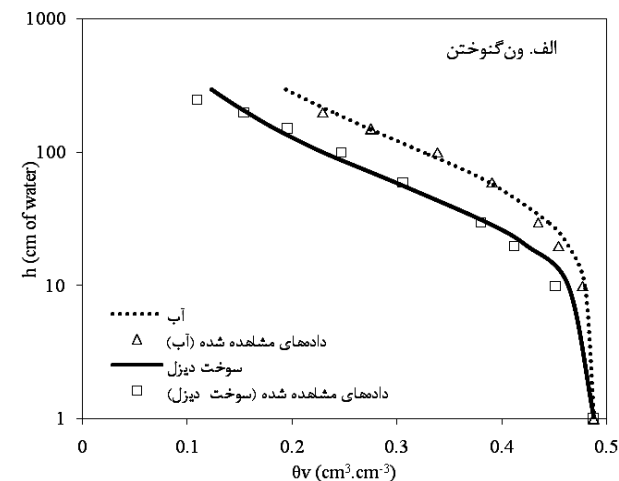
$$CRM = [\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i] / \sum_{i=1}^n O_i \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

### یافته‌ها و بحث

شکل ۱ داده‌های مشاهده شده و داده‌های برآورد شده منحنی های نگه‌داشت خاک را بر مبنای مدل های ون گنوختن، بروکس- کوری، و کمپیل برای آب و سوخت دیزل نشان می دهد.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در یک مقدار فاز مایع حجمی مقدار مکش کمتری برای زهکشی سوخت دیزل نسبت به آب لازم است. بر اساس جدول ۲، کشش سطحی سوخت دیزل کمتر از مقادیر این ویژگی‌ها برای آب است. با توجه به معادله یانگ- لاپلاس  $(\psi_m = -2\sigma / r)$  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 سوخت دیزل نسبت به آب لازم است. به همین دلیل منحنی نگه‌داشت خاک برای سوخت دیزل نسبت به آب در شکل ۱ پایین تر قرار گرفته است. جدول ۳ پارامترهای مدل های برازش یافته به منحنی نگه‌داشت تجربی سوخت دیزل و آب را نشان می دهد.

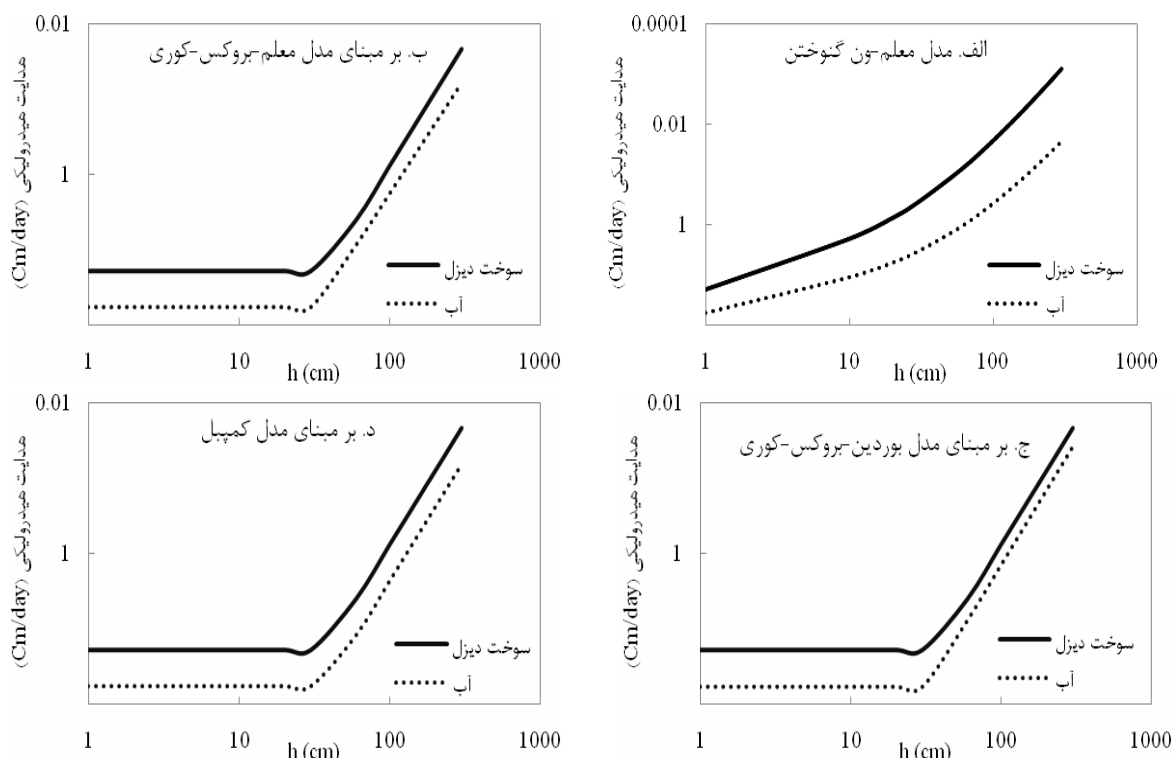
بر مبنای جدول ۳، مقدار پارامترهای توزیع خلل و فرج یا شیب منحنی  $(1/b, \lambda, n, m)$  در سیستم دوفازی سوخت دیزل- هوا نسبت به آب- هوا تغییر زیادی نداشته است. بنابراین شیب منحنی نگه‌داشت خاک در سیستم دوفازی سوخت دیزل- هوا و آب- هوا تقریباً بدون تغییر است. به علاوه، مقدار پارامترهای نماینده پتانسیل ورود هوا  $(\lambda/h_0)$  و  $\alpha$  در منحنی نگه‌داشت خاک برای سیستم دوفازی سوخت دیزل- هوا نسبت به آب- هوا افزایش داشته است. با توجه به اینکه پارامترهای نماینده پتانسیل ورود هوا با عکس نقطه ورود هوا مرتبط است، این بدان معناست که مقدار کمتری برای خارج کردن سوخت دیزل نسبت به آب لازم است. نتایج بررسی پارامتری این پژوهش با نتایج پژوهش های Liu *et al.* (1994)، Jarsjö *et al.* (1998)،



شکل ۱. داده‌های اندازه‌گیری شده و منحنی های نگه‌داشت برآورد شده خاک برای آب و سوخت دیزل

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	-	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	$\text{cm} \cdot \text{day}^{-1}$	
۱٫۵۹	۰٫۳۷	۰٫۱۵	۰٫۰۰	۰٫۵	۰٫۲۷	۰٫۴۱	۰٫۰۰	۳۷	۲٫۴	۰٫۴۹	۵۷٫۸۴	آب
۱٫۶۲	۰٫۳۸	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۵	۰٫۶۵	۰٫۴۱	۰٫۰۰	۱۵٫۲	۲٫۴	۰٫۴۹	۱۹٫۱	سوخت دیزل



شکل ۲. منحنی‌های برآوردشده پتانسیل ماتریک-هدایت هیدرولیکی خاک مطالعه‌شده برای سوخت دیزل و آب

برای آب همواره بیشتر از سوخت دیزل بود (شکل ۲). با تقسیم‌کردن پتانسیل ماتریک خاک در منحنی نگه‌داشت تجربی سوخت دیزل بر پتانسیل ماتریک خاک در منحنی نگه‌داشت تجربی آب (در حجم یکسان مایع خاک) مقدار ۰٫۴۳ به دست آمد. فاکتور مقیاسی لورت (رابطه ۵) با توجه به نسبت کشش سطحی سوخت دیزل و آب حدود ۰٫۳۷ تعیین گردید. بنابراین مدل مقیاسی لورت با دقت مناسبی منحنی نگه‌داشت سوخت دیزل- هوا را برآورد کرده است. نتایج ارزیابی اعتبار مدل‌های هیدرولیکی خاک در جدول ۴ می‌آید. این جدول نشان می‌دهد در سیستم‌های دوفازی آب- هوا و NAPL- هوا، دو مدل کمپیل و بروکس- کوری کارایی کمتری نسبت به مدل ون‌گنوختن دارند. بنابراین مدل ون‌گنوختن کارایی بیشتری برای پیش‌بینی منحنی نگه‌داشت هر دو سیال آب و سوخت دیزل دارد. همچنین کارایی و دقت

طبق تعریف، لزوجت یا گرانروی بیانگر نیروی اصطکاک بین لایه‌های سیال در جریان و در حقیقت نیروی بازدارنده حرکت است (Streeter et al, 1998). بنابراین، گرانروی بالای سیالات بیانگر اصطکاک و مقاومت بیشتر در برابر جریان است. جدول ۲ نشان می‌دهد لزوجت مطلق سوخت دیزل حدود دو برابر بیشتر از آب است. در نتیجه هدایت هیدرولیکی اشباع محیط برای سوخت دیزل 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 با توجه به نگه‌داشت کمتر خاک برای سوخت دیزل، در پتانسیل ماتریک یکسان مقدار مایع خاک در سیستم سوخت دیزل- هوا کمتر است که این پدیده باعث کاهش تخلخل مؤثر در جریان خاک می‌شود. بنابراین، مقدار هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک

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

مدل	سیال	ME (-)	RMSE (%)	CD (-)	EF (-)	CRM (-)
ون گنوختن	سوخت دیزل	۲٫۷	۱٫۳	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۰۰
	آب	۱٫۲	۰٫۷	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۰۰
بروکس-کوری	سوخت دیزل	۴٫۳	۲٫۵	۰٫۹۸	۰٫۹۶	-۰٫۰۱
	آب	۵٫۳	۲٫۳	۰٫۶۸	۰٫۸۹	-۰٫۰۳
کمپیل	سوخت دیزل	۴٫۳	۲٫۴	۰٫۹۸	۰٫۹۶	-۰٫۰۲
	آب	۵٫۳	۲٫۳	۰٫۸۱	۰٫۹۳	-۰٫۰۳

آب نکه‌داشت خاک برای سوخت دیزل از آب کمتر است. همچنین تغییرات پارامترهای توزیع تخلخل یا شیب منحنی  $(\lambda, n, b, \alpha)$  ناچیز و پارامترهای نقطه ورود هوا  $(\alpha, h_0)$  مدل‌های هیدرولیکی در حضور سوخت دیزل افزایش می‌یابد. به دلیل لزوجت سینماتیکی بیشتر سوخت دیزل نسبت به آب و نکه‌داشت کمتر سوخت دیزل در محیط، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای سوخت دیزل کمتر از آب است. مقدار نسبت داده‌های پتانسیل ماتریک منحنی نکه‌داشت سوخت دیزل به پتانسیل ماتریک منحنی نکه‌داشت آب در حجم یکسان از مایع خاک ۰٫۴۳ بود. با توجه به مقدار فاکتور مقیاسی لورت، ۰٫۳۷، تابع مقیاسی لورت توانسته منحنی نکه‌داشت LNAPL را در شرایط دو فازی با دقت مناسب برآورد کند. نتایج اعتبارسنجی مدل‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد کارایی مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل در برآورد منحنی نکه‌داشت خاک برای سوخت دیزل و آب کمتر از مدل ون گنوختن است. مقدار مثبت آماره CRM مدل ون گنوختن نشان‌دهنده کم‌برآوردی مدل و مقادیر CRM منفی در مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل نشان‌دهنده بیش‌برآوردی آن‌هاست. مقدار آماره RMSE مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل نسبت به دو مدل ون گنوختن بیشتر بود. به طور کلی، مدل ون گنوختن برآوردی بهتر و دقیق‌تر از نکه‌داشت خاک در سیستم‌های دو فازی سوخت دیزل-هوا ارائه می‌کنند.

هر سه مدل ون گنوختن، بروکس-کوری، و کمپیل در برآورد منحنی نکه‌داشت سوخت دیزل بیشتر از آب است. مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل منحنی نکه‌داشت خاک را در نمودارهای لگاریتمی به صورت دو خط متصل شده در نقطه ورود هوا برآورد می‌کنند. این ناپیوستگی<sup>۱</sup> در نقطه ورود هوا به خاک سبب می‌شود مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل داده‌های منحنی نکه‌داشت خاک را بیش‌برآورد کنند (شکل‌های ۱ ب و ۱ ج). مقادیر CRM منفی در مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل نشان‌دهنده بیش‌برآوردی مدل‌هاست. ناپیوستگی مذکور در منحنی نکه‌داشت برآورد شده بر مبنای مدل ون گنوختن دیده نمی‌شود. به عبارت دیگر، نگاه مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل به فرایند ورود هوا به خاک به صورت نقطه‌ای و دیدگاه مدل ون گنوختن به صورت فرایندی تدریجی است. بنابراین بیش‌برآوردی 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 نشان‌دهنده کم‌برآوردی مدل ون گنوختن است. به علاوه، مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل RMSE کمتری نسبت به مدل ون گنوختن دارند. به طور کلی، مدل ون گنوختن بهترین پیش‌بینی را برای منحنی نکه‌داشت آب و سوخت دیزل ارائه می‌کند.

#### نتیجه‌گیری

نتایج بررسی پارامتریک نکه‌داشت سوخت دیزل و آب در خاک نشان داد به دلیل کشش سطحی کمتر سوخت دیزل نسبت به

## REFERENCES

- Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1966). Properties of porous media affecting fluid flow, Journal of the irrigation and drainage division. In: Proceedings of American Society of Civil Engineerings, pp. 61-88.
- 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 Science*, 117(6), 311-314.
- 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.
- 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.
- 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, 9-28.
- Homaei, 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*.
- 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 diesel fuel: Laboratory experiments on glacial and post-glacial soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 17(2), 167-185.
- Khodaverdilo, H., Homaei, M., van Genuchten, M.T. 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. and Parker, J. (1988). Experimental validation of the theory of extending two-phase saturation-pressure relations to three-fluid phase systems for monotonic drainage paths. *Water Resources Research*, 24(3), 373-380.
- 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(3-4), 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*. McGraw-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. (1992). Modeling the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. In: proceeding of Indirect Methods of Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. Univ. of California, Riverside, pp.: 15-36.
- Nouri, M., Homaei, M. and Bybordi, M. (2012a). Parametric assessment of soil retention curves in three phase NAPL-water-air system. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(2), 15-24. (In Farsi)
- Nouri, M., Homaei, M. and Bybordi, M. (2012b). Parametric Investigation of Kerosene-Air Capillary Pressure-Saturation Functions. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(1), 35-47. (In Farsi)
- Nouri, M., Homaei, M. and Bybordi, M. (2014). Comparing petroleum and water hydraulic properties in soil JWSS - Isfahan University of Technology, 17(66), 123-133. (In Farsi)
- 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.
- Sharma, R.S. and Mohamed, M.H.A. (2003). An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated, saturated sand. *Engineering Geology*, 70(3-4), 305-313.
- Streeter, V.L., Wylie, E.B. and Bedford, K.W. (1998). *Fluid mechanics* (9th ed). McGraw-Hill.
- van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Weiner, E.R. (2000). Applications of environmental chemistry: a practical guide for environmental professionals. CRC Press.
- Zarei, G., Homaei, M., Liaghat, A.M. and Hoorfar, A.H. (2010). A model for soil surface evaporation based on Campbell's retention curve. *Journal of Hydrology*, 380(3-4), 356-361.