

ارزیابی پارامتریک توانایی نگهداشت خاک در حضور نفت خام در حالت سه فازی^۱

میلاذ نوری^۱، مهدی همایی^{۲*} و محمد بای بوردی^۳

(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: mhomaee@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۳۰

چکیده

آلودگی زدایی خاک‌های آلوده به مواد نفتی برای حفاظت بهینه از منابع آب و خاک بسیار ضروری است. هرگونه آلودگی زدایی چنین خاک‌های مستلزم ارزیابی کمی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در حضور این آلاینده‌ها می‌باشد. هدف از این پژوهش، بررسی توانایی نگهداشت خاک و اثر مقدار NAPL بر توانایی نگهداشت خاک در شرایط سه فازی NAPL-آب-هوا بود. بدین منظور، منحنی‌های نگهداشت خاک در سه نسبت اولیه ۷۵-۲۵، ۵۰-۵۰ و ۷۵-۲۵ NAPL-آب بوسیله دستگاه ستون آویزان تعیین شد. سپس منحنی‌های نگهداشت خاک توسط سه مدل ون‌گونختن، بروکس-کوری و کمپیل برآورد شد. همچنین، دقت مدل‌های هیدرولیکی بوسیله آماره‌های ME، RMSE، EF، CD و CRM آزموده شد. نتایج نشان داد که مقدار پارامترهای توزیع تخلخل و نقطه ورود هوا در مدل‌های هیدرولیکی با افزایش LNAPL در محیط سه فازی کاهش یافت. بنابراین شیب و مکش نقطه ورود هوا در منحنی‌های نگهداشت خاک در سیستم‌های سه فازی افزایش می‌یابد. همچنین در مقدار معینی فاز مایع، مکش بیشتری برای زهکشی مایع خاک در سیستم‌های سه فازی NAPL-آب-هوا نسبت به دو فازی آب-هوا لازم است. بنابراین خاک نگهداشت بیشتری برای سیستم‌های سه فازی دارد. همچنین مقدار آماره‌ها نشان داد که مدل ون‌گونختن برآورد مناسب‌تری از منحنی نگهداشت NAPL در سیستم سه فازی دارد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های سه فازی NAPL-آب-هوا؛ مدل‌های هیدرولیکی خاک؛ منحنی نگهداشت خاک؛ NAPL

مقدمه

(Jarsjo et al., 1994). انتقال مواد نفتی به آب‌های زیرزمینی تابعی از خصوصیات آلاینده‌های نفتی و محیط متخلخل است (Newell et al., 1995). از عوامل وابسته به NAPL ها می‌توان به گرانروی، جرم ویژه، قابلیت خیس‌کنندگی^۴، کشش سطحی و مقدار مایع نشت کرده و از پارامترهای مربوط به محیط متخلخل به هدایت هیدرولیکی، بافت و سازند مادر، وجود حرکت ترجیحی^۵

هنگامی که NAPL ها^۲ وارد خاک می‌شوند، بخشی از آن‌ها تبخیر، قسمتی توسط موجودات زنده خاک تجزیه، جزیی توسط نیروی موئینگی خاک نگهداشت و بخشی به صورت اختلاط ناپذیر^۳ در محیط‌های متخلخل انتقال می‌یابند.

^۱ برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی،

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

^۴ Wettability

^۵ Preferential flow

^۲ Non-Aqueous Phase Liquids

^۳ Immiscible displacement

(1992) و Wilson و همکاران (1989) صحت نظریات لورت را تنها در دامنه‌ی محدودی از پتانسیل ماتریک خاک تایید کردند. Parker و همکاران (1987) با استفاده از فرضیات لورت معادله منحنی نگهداشت خاک ون گنوختن را برای NAPL و آب در سیستم‌های سه فازی ارایه کردند:

$$\bar{S}_w^{aow} = (1 + (\alpha_{ow} h_{ow})^n)^{-m} \quad (5)$$

$$\bar{S}_t^{aow} = (1 + (\alpha_{ao} h_{ao})^n)^{-m} \quad (6)$$

$$\bar{S}_w^{aow} = (S_w^{aow} - S_r) / (1 - S_r) \quad (7)$$

$$\bar{S}_t^{aow} = (S_t^{aow} - S_r) / (1 - S_r) \quad (8)$$

که در آن S_r مجموع مقدار NAPL و آب باقیمانده است. همچنین $S_t = S_w + S_o$ است. اندیس aow نشان دهنده سه فازی بودن محیط است. همچنین Parker و همکاران (1987) فرض کردند که قابلیت خیس کنندگی آب بیشتر از NAPL، و NAPL بیشتر از هوا است.

Cui و همکاران (2003) به بررسی اثر مقدار جرم ویژه و رطوبت اولیه خاک بر روی نگهداشت و هدایت خاک برای سالترو (نوعی LNAPL) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش جرم ویژه خاک، نگهداشت خاک برای LNAPL افزایش یافت. همچنین با کاهش مقدار رطوبت خاک، هدایت هیدرولیکی و نگهداشت سالترو در سیستم‌های سه فازی افزایش یافت.

Alferi و همکاران (2001) به بررسی نگهداشت خاک silty sand (مخلوطی از یک خاک silt و یک خاک sand) در شرایط سه فازی سالترو-آب-هوا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در سیستم‌های سه فازی نگهداشت محیط متخلخل برای مایع خاک افزایش می‌یابد و پارامتر نقطه ورود هوا منحنی نگهداشت کاهش یافت. تغییر توزیع تخلخل یکی از مهمترین پیامدهای حضور NAPLها در خاک است. نتایج پژوهش Alferi و همکاران نشان داد که توزیع تخلخل خاک در اثر حضور LNAPL در خاک از حالت تک تخلخل^۱ به دو تخلخل^۱ تغییر یافت. Lenhard و

و عمق سفره آب زیرزمینی اشاره کرد (Mercer and Cohen, 1990; Newell et al., 1995).

مدل‌سازی انتقال آلاینده‌های آلی در محیط متخلخل چند فازی، نیازمند حل معادله جریان برای تمامی اجزای محرک در سیستم است (Pinder and Grey, 2008). معادله Richards (1931) چگونگی انتقال سیالات در محیط متخلخل غیر اشباع را بیان می‌کند. این معادله برای محیط‌های متخلخل تراکم ناپذیر در شرایط سه فازی به صورت زیر نوشته می‌شود (Parker et al., 1987; Bear and Cheng, 2008):

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

$$\xi \left(\frac{\partial S_o}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \{ (k_o (\nabla h_o + 1)) \} \quad (2)$$

$$\xi \left(\frac{\partial S_a}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \{ (k_a (\nabla h_a + 1)) \} \quad (3)$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) i + \left(\frac{\partial}{\partial y} \right) j + \left(\frac{\partial}{\partial z} \right) k \quad (4)$$

که در آن‌ها k_i تخلخل خاک و S_o ، S_w و S_a درصد حجمی به ترتیب آب، NAPL و هوا، K_w ، K_o و K_a هدایت هیدرولیکی محیط برای آب، NAPL و هوا و h_w ، h_o و h_a پتانسیل ماتریک محیط برای آب، NAPL و هوا است.

اساس اغلب پژوهش‌های منحنی نگهداشت خاک در سیستم‌های سه فازی، فرضیات Leverett (1941) است. این فرضیات، رابطه‌ی حجم مایع-پتانسیل ماتریک خاک (S_t - h) در شرایط دو فازی NAPL-هوا را به شرایط سه فازی NAPL-آب-هوا بسط می‌دهند. بر مبنای این فرضیات در سیستم‌های سه فازی، ماده هیدروکربنی به‌روی لایه‌های آب جذب شده به ذرات خاک قرار گرفته و باعث از بین رفتن سطح تماس آب-هوا می‌شود. بنابراین در سیستم‌های سه فازی NAPL-آب-هوا مقدار حجمی مایع کل تابعی از بار فشار موئینه‌ی سطح تماس NAPL-هوا (h_{oa}) است. Lenhard و Parker (1988)، و Ferrand و همکاران (1990) فرضیات لورت را آزموده و تایید کردند. لیکن Busby و همکاران (1995)، McBride و همکاران

^۱ Unimodal

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} K(\theta) = 0 \quad (10)$$

Campbell (1974) نیز معادله‌ای برای پیش‌بینی رابطه پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک ارائه داده است:

$$\theta = \theta_s \left(\frac{h}{h_0} \right)^{-1/b} \quad (11)$$

که در آن h_0 پتانسیل ماتریک خاک در نقطه ورود هوا به خاک و b پارامتر توزیع تخلخل منحنی رطوبتی و عکس λ (معادله ۹) است.

van Genuchten (1980) نیز مدلی برای برآورد منحنی نگهداشت خاک ارائه کرده است:

$$S_e = (1 + (\alpha h)^n)^{-m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (12)$$

که در آن m و n پارامترهای شیب منحنی نگهداشت خاک و α با عکس مقدار نقطه ورود هوا منحنی رطوبتی مرتبط است.

نفت خام یکی از مهمترین آلاینده‌های هیدروکربنی است که در اثر نشت مخازن زیر زمینی و لوله‌های انتقال وارد محیط زیست می‌شود. بنابراین، بررسی توانایی نگهداشت و انتقال خاک برای نفت خام در سیستم‌های دو فازی NAPL-هوا و سه فازی NAPL-هوا-آب امری ضروری تلقی می‌شود. در این راستا، هدف از انجام این پژوهش، بررسی منحنی نگهداشت خاک در سیستم‌های سه فازی نفت خام-آب-هوا و اثر مقدار نفت خام بر نگهداشت خاک در شرایط سه فازی NAPL-آب-هوا بود.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های فیزیکی محیط متخلخل مورد مطالعه در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

در این جدول، σ_g و d_g به ترتیب انحراف معیار هندسی و میانگین هندسی قطر ذرات خاک می‌باشند (Shirazi and Boersma, 1984). همچنین از طریق آزمایش ستون‌های الک، توزیع اندازه ذرات خاک تعیین و رسم شد. شکل ۱ توزیع اندازه ذرات خاک را نشان می‌دهد.

همکاران (2004) به تاثیر حضور NAPL بر روی توزیع تخلخل خاک در دو حالت آب‌گیری و زهکشی پرداختند. آن‌ها با توجه به شباهت‌های بین مدل‌سازی رطوبت باقیمانده^۲ و NAPL باقیمانده، مدلی ریاضی برای برآورد مقدار NAPL باقیمانده در محیط‌های سه فازی NAPL-هوا-آب ارائه دادند.

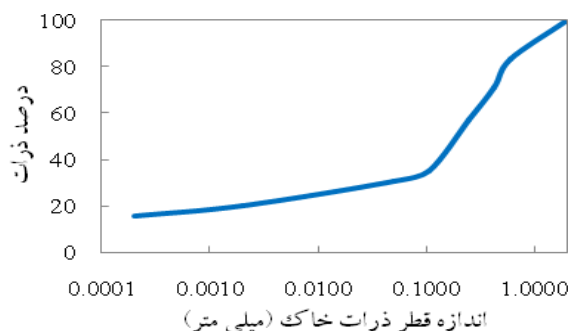
حل معادله ریچاردز در محیط‌های متخلخل غیراشباع نیازمند وجود تابع پیوسته‌ی مقدار حجمی فاز مایع و هدایت هیدرولیکی خاک به عنوان تابعی از پتانسیل ماتریک خاک است (van Genuchten, 1980; van Genuchten and Nielsen, 1985). منحنی نگهداشت خاک^۳ رابطه بین پتانسیل ماتریک و مقدار حجمی فاز مایع خاک را نشان می‌دهد. تا کنون روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری مستقیم منحنی نگهداشت خاک ارائه شده است (Dane and Hopmans, 2002). با وجود پیشرفت‌های که برای اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی خاک دیده می‌شود، این روش‌ها همچنان وقت‌گیر و پرهزینه هستند. تا کنون تلاش‌های بسیاری برای مدل‌سازی منحنی نگهداشت خاک صورت گرفته است. Brooks و Corey (1964) با بکار بردن ماده نفتی سالترو^۴ مدلی برای برآورد مقدار حجمی فاز مایع به عنوان تابعی از پتانسیل ماتریک خاک ارائه کرده‌اند:

$$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = (\alpha h)^{-\lambda} \quad (9)$$

که در آن، λ پارامتر توزیع خلل و فرج، θ_s مقدار حجمی مایع خاک در حالت اشباع و در شرایط ایده‌آل معادل تخلخل خاک است و α با معکوس پتانسیل ماتریک خاک در نقطه ورود هوا^۵ به خاک مرتبط است. هنگامی که مقدار فاز مایع خاک به θ_r کاهش یابد، هدایت هیدرولیکی خاک به صفر میل می‌کند:

¹ Biomodal
² Residual or irreducible moisture
³ Soil retention curve
⁴ Soltrol
⁵ Air entry value or bubbling pressure

آلاینده به‌کار رفته در این پژوهش نفت خام^۱ بود. نفت خام یا نفت سنگ آمیزه‌ی پیچیده‌ای از هیدروکربن‌هایی گوناگون است که عمدتاً از دو عنصر هیدروژن و کربن تشکیل شده و دارای مقادیر کمی از نیتروژن، اکسیژن و گوگرد هستند (Lide, 2003). ویژگی‌های فیزیکی این سیالات در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- منحنی توزیع اندازه ذرات خاک مورد مطالعه

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش

σ _g	d _g	ρ _p	ρ _b	تخلخل حجمی	سیل		بافت
					رس	شن	
mm		g.cm ⁻³		%			
۰.۲	۷	۷	۱.۶	۴۸/۹	۱.۶	۷	sandy loam
۱۱	۶۲	۲.۶	۱.۰		۱.۰	۶۲	

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی نفت خام بکار رفته در آزمایش

نام سیال	وزن مخصوص (g.cm ⁻³)	گرانروی دینامیکی (cp ^۱)	گرانروی سینماتیکی (cst ^۱)	کشش سطحی (dyne.cm ⁻¹)
نفت خام	۰.۸۷	۷/۸	۸/۹	۲۸/۶۳
آب	۱	۱	۱	۷۲/۲

۱- سانتی پواز، ۲- سانتی استوکس

گرفتند. در هر مرحله از اعمال مکش، مقدار سیال زهکش شده در 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. فرآیند اعمال مکش تا ۲۷۰ سانتی‌متر آب ادامه یافت. مقدار پتانسیل ماتریک مایع خاک نیز با محاسبه اختلاف سطح آب در شاخه آزاد و نمونه‌های خاک (h) بدست آمد.

بدین ترتیب رابطه پتانسیل ماتریک و مقدار حجمی مایع خاک (S_l-h) بدست آمد.

منحنی نگهداشت آب و نفت خام توسط تابع هیدرولیکی ون گنوختن، بروکس-کوری و کمپبل تا مکش ۱۵ بار پیش‌بینی شد. برای بررسی آماری صحت پیش‌بینی مدل‌ها

منحنی‌های نگهداشت خاک در سیستم‌های سه فازی NAPL-هوا-آب به‌وسیله‌ی دستگاه ستون آویزان^۲ رسم شد. در ابتدا نمونه‌های خاک بر مبنای جرم ویژه ظاهری خاک فشرده شدند. سپس ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلخل کل نمونه‌های خاک با نفت خام از زیر اشباع شدند. نمونه‌های خاک بر روی صفحه سرامیکی قیف بوخنر^۳ دستگاه ستون آویزان قرار گرفتند تا بقیه تخلخل خاک با آب اشباع کامل شود. در نتیجه تخلخل ابتدایی نمونه‌های خاک با نسبت-های ۲۵-۷۵، ۵۰-۵۰ و ۲۵-۷۵ نفت خام-آب کاملاً اشباع شد. با تنظیم ارتفاع سطح آب در شاخه آزاد دستگاه از نمونه خاک (h)، نمونه‌ها تحت مکش‌های مشخصی قرار

¹ Petroleum (unrefined crude oil)

² Hanging column apparatus

³ Buchner funnel

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (17)$$

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 ۲ 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 شکل ۲ قابل مشاهده است، در همه‌ی سیستم‌های سه فازی NAPL-آب-هوا، در مقدار معینی از سیال خاک مقدار مکش بیشتری برای زهکشی مایع خاک نسبت به سیستم دو فازی آب-هوا لازم است. این نتایج با نتایج پژوهش Alferi و همکاران (2011)، و Cui و همکاران (2003) همسو است. همچنین با افزایش مقدار نفت خام، در مقدار مشخصی از فاز مایع مقدار مکش بیشتری برای خارج کردن مایع خاک نیاز است. بنابراین در سیستم‌های سه فازی، بیشترین نگهداشت محیط برای ترکیب ۷۵-۲۵ نفت خام-آب می‌باشد. پس از آن، خاک بیشترین نگهداشت را به ترتیب برای ترکیبات ۵۰-۵۰ و ۷۵-۲۵ NAPL-آب دارد. جدول ۳ پارامترهای معادله‌های ون‌گنوختن، بروکس-کوری و کمپبل برای منحنی‌های نگهداشت خاک را در شرایط سه فازی NAPL-آب-هوا و شرایط دو فازی آب-هوا نشان می‌دهد.

از آماره‌های خطای 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 نشان دهنده مقدار خطای مدل است (Zarei 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 تمایل مدل به بیش برآوردی یا کم برآوردی مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد (Khodaverdiloo et al., 2011). مقدار منفی CRM تمایل به بیش برآوردی را نشان می‌دهد و CRM مثبت یعنی نمون داده‌ها را کمتر از داده‌های مشاهده شده پیش‌بینی کرده است. اگر مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده مدل برابر باشند، $ME=0$ ، $RMSE=0$ ، $EF=1$ ، $CD=1$ و $CRM=0$ است. شرح ریاضی آماره‌های ذکر شده به صورت زیر است (Homaei et al., 2002):

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

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

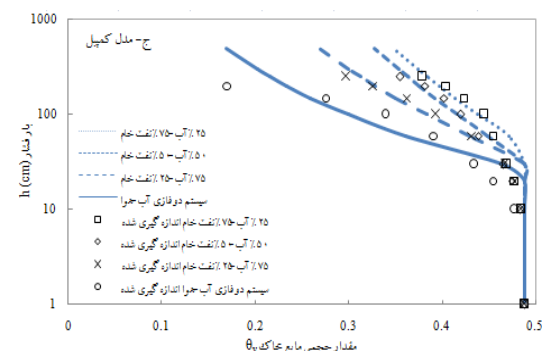
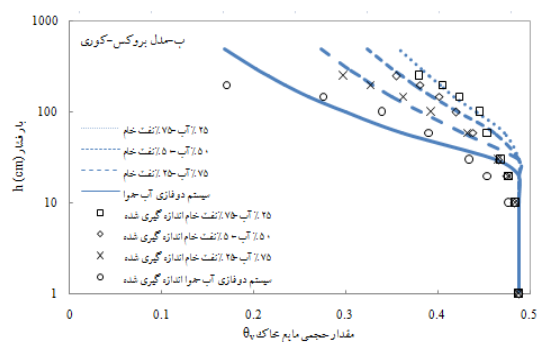
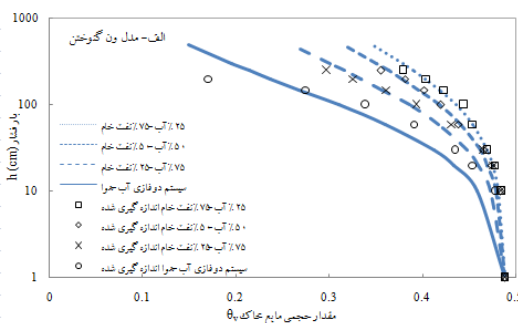
$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

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

سه فازی نسبت به شرایط دوفازی آب-هوا لازم است. به-
 طور کلی با کاهش مقدار نفت خام در سیستم‌های سه فازی،
 مقدار پارامترهای نقطه ورود هوا و توزیع تخلخل منحنی-
 های رطوبتی افزایش می‌یابد (جدول ۳).

هنگامی که NAPLها در محیط متخلخل قرار می‌گیرند، به
 تله افتادن این مواد در مجاری خاک باعث بسته شدن این
 مجاری و کاهش تخلخل موثر در جریان می‌شوند. بسته
 شدن برخی از مجاری خاک باعث ایجاد جریان ترجیحی^۱
 در خاک می‌شود. به عبارت دیگر NAPLها با تغییر توزیع
 تخلخل خاک، بر منحنی رطوبتی تاثیر می‌گذارند. همچنین
 دفع آب بوسیله NAPL باقیمانده بر روی ذرات خاک
 سبب ایجاد تاخیر در جریان آب در خاک‌های آلوده به نفت
 می‌شود. به تله افتادن NAPL در خلل و فرج مسدود خاک
 و محبوس شدن هوای خاک به دلیل بسته شدن مجاری
 بوسیله NAPLها، نیز باعث از دست رفتن بخشی از
 تخلخل قابل زهکشی خاک می‌شود. تمامی موارد ذکر شده
 باعث افزایش مقاومت هیدرولیکی^۲ در برابر جریان مایع
 خاک می‌شود. با توجه به رابطه معکوس بین مقاومت و
 هدایت هیدرولیکی می‌توان نتیجه گرفت که هدایت
 هیدرولیکی محیط متخلخل در سیستم‌های سه فازی
 NAPL-آب-هوا کاهش می‌یابد. آماره‌های مربوط به اعتبار
 سنجی مدل‌های هیدرولیکی به‌کار رفته در این پژوهش در
 جدول ۴ ارائه شده است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که
 کارایی (EF) مدل ون‌گنوختن از مدل‌های کمپیل و
 بروکس-کوری بیشتر است. مدل‌های بروکس-کوری و
 کمپیل منحنی رطوبتی خاک را در نمودارهای لگاریتمی به
 صورت دو خط متصل شده در نقطه ورود هوا برآورد
 می‌کنند. این ناپوستگی^۳ در نقطه ورود هوا به خاک سبب
 بیش برآوردی مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل می‌شود
 (شکل‌های ۲.ب و ۲.ج). مقادیر CRM منفی در مدل‌های
 بروکس-کوری و کمپیل نشان دهنده‌ی این بیش‌برآوردی



شکل ۲- منحنی‌های نگهداشت مایع خاک مورد مطالعه

از دیدگاه پارامتریک، مقدار پارامترهای نقطه ورود هوا (α)
 و منحنی نگهداشت خاک در سیستم‌های سه فازی
 نسبت به سیستم دو فازی آب-هوا کاهش یافته است. با
 توجه به رابطه‌ی معکوس این پارامترها با نقطه ورود هوا به
 خاک، این کاهش نمادی از افزایش مقدار نقطه ورود هوا
 به خاک در شرایط سه فازی NAPL-آب-هوا است.
 همچنین، مقدار پارامترهای توزیع تخلخل خاک (n , λ) و
 $1/b$) نیز کاهش یافته است. کاهش پارامترهای توزیع خلل
 و فرج خاک بیانگر افزایش شیب منحنی رطوبتی در
 سیستم‌های سه فازی است. این نتایج نشانگر آن است که
 مقدار نیروی بیشتری برای خارج کردن سیالات در شرایط

¹ Bypass flow
² Hydraulic resistance
³ discontinuity

است. مدل ون گنوختن منحنی نگهداشت خاک قبل از ورود هوا به خاک را به صورت سهموی پیش‌بینی می‌کند. در نتیجه ناپیوستگی مذکور در نقطه ورود هوا به خاک در منحنی نگهداشت‌های برآورد شده بر مبنای مدل ون گنوختن وجود ندارد. به عبارت دیگر، نگاه مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل به فرآیند ورود هوا به خاک به صورت نقطه‌ای و دیدگاه مدل ون گنوختن به صورت فرآیندی تدریجی می‌باشد. بنابراین بیش برآوردی مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل در مدل ون گنوختن دیده نمی‌شود (شکل ۲. الف) و CRM مدل ون گنوختن مثبت است. به غیر از سیستم سه فازی با نسبت اولیه ۲۵-۷۵ نفت خام-آب، مدل ون گنوختن RMSE و ME کمتری نسبت به مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل دارد. همچنین با کاهش مقدار نفت خام در سیستم‌های سه فازی کارایی مدل‌های کمپیل و بروکس-کوری افزایش یافته است.

از دیدگاه پارامتریک، پارامترهای شکل $(n, \lambda, 1/b)$ و نقطه ورود هوا به خاک $(\alpha, 1/h_0)$ مدل‌های هیدرولیکی در شرایط سه فازی نسبت به شرایط دو فازی کاهش یافته است. این کاهش نشانگر افزایش مقدار نقطه ورود هوا به خاک و شیب منحنی رطوبتی خاک در شرایط سه فازی است. تغییر توزیع تخلخل خاک، مهم‌ترین عامل افزایش نگهداشت سیال خاک در سیستم‌های سه فازی است. به طوری کلی نتایج نشان داد که مقاومت در برابر جریان در سیستم‌های سه فازی نفت خام-آب-هوا بیشتر از سیستم‌های دو فازی آب-هوا است.

همچنین مقادیر آماره‌های ME، RMSE و EF بیانگر آن است که مدل ون گنوختن نسبت به دو مدل دیگر دقت و اعتبار برآورد بیشتری دارد. وجود ناپیوستگی در منحنی نگهداشت‌های برآورد شده بر مبنای مدل‌های بروکس-کوری و کمپیل دلیل بیش برآوردی و CRM منفی مدل‌ها است. حال آن مقادیر CRM مثبت مدل ون گنوختن در شرایط دو فازی و سه فازی نشانگر کم برآوردی مدل ون گنوختن است.

اعتبار مدل ون گنوختن در برآورد منحنی نگهداشت خاک در سیستم‌های سه فازی نفت خام-آب-هوا نسبت به دو مدل دیگر بیشتر است

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که نگهداشت مایع خاک در شرایط سه فازی نفت خام-آب-هوا نسبت به شرایط دو فازی آب-هوا بیشتر است. همچنین افزایش مقدار

جدول ۳- پارامترهای مدل‌های ون گنوختن، بروکس-کوری و کمپیل در شرایط دو فازی و سه فازی

مدل										ترکیب (NAPL)- آب
ون گنوختن					بروکس-کوری			کمپیل		
n	m	α	θ_s	θ_r	α	λ	θ_r	h_0	b	
۱/۶۹	۰/۴	۰/۰۰۹	۰/۴۹	۰/۰۰۱۶	۰/۰۲۹	۰/۳۷	۰/۰۰۴	۳۸/۷	۲/۱	آب
۱/۲۷	۰/۲۱	۰/۰۰۵	۰/۴۹	۰/۰۰۰۷	۰/۰۲۱	۰/۱۶	۰/۰۷	۴۷/۴	۶/۹	۲۵-۷۵
۱/۲۹	۰/۲۲	۰/۰۰۷	۰/۴۹	۷/۹×۱۰-۵	۰/۰۲۲	۰/۲۲	۰/۰۹	۳۴/۳	۶/۷	۵۰-۵۰
۱/۳۸	۰/۲۷	۰/۰۰۸	۰/۴۹	۷/۹×۱۰-۵	۰/۰۳	۰/۲۷	۰/۰۷	۳۳/۹	۴/۵	۷۵-۲۵

جدول ۴- آماره‌های محاسبه شده اعتبار سنجی مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس-کوری و کمپیل

مدل	ترکیب (نفت خام-آب)	ME (%)	EF (-)	RMSE (%)	CD (-)	CRM (-)
ون‌گنوختن	۲۵-۷۵	۱/۱۱	۰/۹۷	۰/۵۲	۱/۱۵	۰/۰۰۲
	۵۰-۵۰	۰/۸۵	۰/۹۹	۰/۴۴	۱/۰۹	۰/۰۰۳
	۷۵-۲۵	۱/۸۶	۰/۹۶	۱/۲۸	۱/۳	۰/۰۱۳
	آب	۶/۷	۰/۹۱	۳/۰۶	۱/۴۴	۰/۰۱۹
بروکس-کوری	۲۵-۷۵	۱/۹	۰/۹۱	۳/۱	۰/۷۹	-۰/۰۰۷
	۵۰-۵۰	۲/۳	۰/۹۲	۱/۲۴	۰/۷۹	-۰/۰۱۴
	۷۵-۲۵	۲/۱۹	۰/۹۷	۱/۱۴	۰/۹۴	-۰/۰۰۷
	آب	۸/۴	۰/۸۶	۳/۷۶	۰/۷۱	-۰/۰۰۶
کمپیل	۲۵-۷۵	۱/۹	۰/۹۱	۳/۲	۰/۷۶	-۰/۰۰۷۷
	۵۰-۵۰	۲/۲۳	۰/۹۴	۱/۰۶	۰/۸۱	-۰/۰۰۱
	۷۵-۲۵	۲/۱۹	۰/۹۷	۱/۰۸	۰/۹۵	-۰/۰۰۱
	آب	۵/۳۴	۰/۹	۳/۱۸	۰/۹۳۷	-۰/۰۰۳

transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management* 57:89-109.

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* 17:167-185.

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* 399:93-99.

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* 24:373-380.

Lenhard, R.J., Oostrom, 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. *Journal of Contaminant Hydrology* 71:261-282.

Leverett, M. 1941. Capillary behavior in porous media. *Trans. AIME* 142:341-358.

Lide, D.R. 2003. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 84th. FL: CRC Press Boca Raton.

Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics* 11:431-441.

McBride, J., Simmons, C. and Cary, J. 1992. Interfacial spreading effects on one-dimensional organic liquid imbibition in water-wetted porous media. *Journal of Contaminant Hydrology* 11:1-25.

فهرست منابع

Alferi, M., Romero, E. Dominijanni, A. and Manassero, M. 2011. LNAPL retention in partially saturated silty sand. In: Alonso & Gens (eds). *Unsaturated Soils*. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60428-4.

Bear, J. and Cheng, A.H.-D. 2008. *Modeling groundwater flow and contaminant transport*: Springer Verlag.

Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers*, Colorado State University.

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.

Cui, Y., Delage, P. and Alzoghbi, P. 2003. Retention and transport of a hydrocarbon in a silt. *Geotechnique* 53:83-91.

Dane, J. and Hopmans, J. 2002. Water retention and storage. Laboratory. in Dane et al., ed. *Methods of soil analysis*. Part 4:675-680.

Ferrand, L.A., Milly, P., Pinder, G.F. and Turrin, R.P. 1990. A comparison of capillary pressure-saturation relations for drainage in two-and three-fluid porous media. *Advances in Water Resources* 13:54-63.

Francis, C. and Bennet, H. 1922. The Surface Tension of Petroleum. *Industrial & Engineering Chemistry* 14:626-627.

Homae, M., Dirksen, C. and Feddes, R. 2002. Simulation of root water uptake: I. Non-uniform

- flow equation. Water Resour. Prog., Dep. Civ. Eng., Princeton Univ., Princeton, NJ, Res. Rep:09.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J 44:892-898.
- van Genuchten, M.Th. and Nielsen, D. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. Ann. Geophys 3:615-628.
- Wilson, J.L., Conrad, S., Mason, W., Peplinski, W. and Hagan, E. 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).
- 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 380:356-361.
- Mercer, J.W. and Cohen, R.M. 1990. A review of immiscible fluids in the subsurface: Properties, models, characterization and remediation. Journal of Contaminant Hydrology 6:107-163.
- Newell, C.J., Acree, S.D., Ross, R.R. and Huling, S.G. 1995. Light nonaqueous phase liquids. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Solid Waste and Emergency Response.
- Parker, J., Lenhard, R. and Kuppasamy, T. 1987. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. Water Resources Research 23:618-624.
- Pinder, G.F. and Gray, W.G. 2008. Essentials of multiphase flow in porous media: John Wiley & Sons, INC.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1:318-333.
- Shirazi, M.A. and Boersma, L. 1984. A Unifying Quantitative Analysis of Soil Texture. Soil Science Society of America Journal 48:142-147.
- van Genuchten, M.Th. 1978. Numerical solutions of the one-dimensional saturated-unsaturated



ISSN 2251-7480

Parametric assessment of soil retention at presence of petroleum in three-phase system

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: 11-07-2012

Accepted: 21-11-2012

Abstract

Reclamation of oil-contaminated soils is essential for optimal conservation of soil and water resources. Any decontamination of such soils from hydrocarbons contamination requires quantitative evaluation of soil hydraulic properties at presence of such contaminants. The objective of this study was to investigate the soil retention in NAPL-water-air three-phase systems. Consequently, soil retention curves were obtained using hanging column method with three primary NAPL-water ratios 25-75, 50-50 and 75-25. The parameters of soil retention curves were then obtained based on van Genuchten, Brooks-Corey and Campbell models. The model performance was also evaluated based on ME, RMSE, EF, CD and CRM. The results indicated that by decreasing the amount of NAPLs, the pore size distribution parameters of the hydraulic models (n , λ and $1/b$) and their bubbling pressure parameters were both reduced. Therefore, bubbling pressure and slope of soil retention curves were increased. The results also showed that in a given amount of soil liquid phase, more suction is needed to drain out fluids in three-phase (NAPL-water-air) systems compares to two-phase (water-air) system. Thus, in a given quantity of NAPL, the porous media provide more retention for three-phase systems. Also, the calculated statistics indicated that van Genuchten model provides more reasonable predictions for NAPLs retention in three-fluid phase systems for monotonic drainage paths.

Keywords: NAPL; NAPL-water-air three-phase systems; soil hydraulic models; soil retention curve