

بررسی پارامتریک نفوذ برخی آلاینده‌های نفتی نامحلول در آب به خاک

الهه جعفری هفشجانی^۱، صفورا اسدی کپورچال^۲، * مهدی همایی^۳ و محمد بایبوردی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه گیلان،

^۲ استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۳ استاد گروه خاکشناسی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۳

چکیده

سابقه و هدف: آلودگی زیست‌بوم، به‌ویژه خاک از چالش‌های مهم عصر کنونی است. آلاینده‌های مایع آلی نامحلول در آب (NAPL) از مهم‌ترین آلاینده‌های آلی زیست‌محیطی به‌شمار می‌آیند. خاک آلوده افزون بر این‌که آلاینده‌ها را از راه چرخه غذایی وارد بدن انسان می‌کند، خود نیز می‌تواند به‌عنوان منبع آلودگی آب‌های زیرزمینی و آب آشامیدنی باشد. آلاینده‌های مایع آلی نامحلول در آب (NAPL) سهمی بزرگ از کل آلاینده‌های زیست‌محیطی را تشکیل می‌دهند. درک چگونگی نفوذ NAPL‌ها به خاک از اهمیتی ویژه برخوردار است. زیرا با درک آن، می‌توان خاک‌های آلوده به NAPL‌ها را اصلاح و اقداماتی مدیریتی برای جلوگیری از نفوذ آن‌ها به سفره‌های آب زیرزمینی به‌کار گرفت. هدف از این پژوهش، ارزیابی کمی فرآیند نفوذ برخی ترکیبات نفتی شامل نفت خام و نفت سفید به خاک بود.

مواد و روش‌ها: خاک مورد آزمون از اطراف پالایشگاه نفت تهران با بافت لوم‌شنی تهیه شد. با استفاده از مدل‌های نفوذ فیلپ، کوستیاکوف و گرین-امپت پارامترهای نفوذ و با استفاده از قانون داریسی هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردیدند. به‌منظور ارزیابی کمی تخمین‌های حاصل از مدل‌ها، از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با گذشت زمان، طول جبهه رطوبتی و نفوذ تجمعی NAPL‌ها همانند آب به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. بیش‌ترین نرخ نفوذ برای این ترکیبات، هم‌چون آب در زمان‌های ابتدایی نفوذ رخ داد. مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع برای نفت خام و نفت سفید به‌ترتیب ۰/۰۰۵۸ و ۰/۲۸۰ سانتی‌متر بر دقیقه به‌دست آمد. به‌دلیل لزوجت بیش‌تر نفت سفید و کشش سطحی کم‌تر نسبت به آب، نگهداشت این سیال نسبت به آب کم‌تر و نرخ نفوذ آن بیش‌تر بود.

نتیجه‌گیری: نتایج ارزیابی کمی فرآیند نفوذ نفت خام به خاک نشان داد که برای ترکیبات NAPL‌ها هنگامی که زمان به‌سمت بی‌نهایت میل می‌کند، شدت نفوذ پایه آن‌ها با هدایت هیدرولیکی اشباع این ترکیبات برابر نیست. زیرا در اواخر نفوذ، ضریب جذبی خاک تأثیر زیادی بر نفوذ این ترکیبات به خاک دارد. با توجه به نتایج، مدل نفوذ گرین-امپت و کوستیاکوف با در نظر گرفتن آماره RMSE، برآورد بهتری از نفوذ NAPL به خاک ارائه می‌دهند. ویژگی‌های NAPL‌ها هم‌چون نوع ترکیب، ساختار شیمیایی، گرانروی، کشش سطحی و چگالی تأثیری به‌سزا بر نفوذ این ترکیبات به خاک دارند.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، قانون داریسی، مدل‌های نفوذ، هدایت هیدرولیکی اشباع، NAPL

* مسئول مکاتبه: mhomaee@modares.ac.ir

مقدمه

حفظ کیفیت زیست‌بوم امروزه از اهمیتی ویژه برخوردار است. فعالیت‌های انسانی سبب ایجاد آلودگی‌های فراوانی در محیط زیست شده‌اند. هر چند که این آلاینده‌ها را می‌توان به دو گروه بزرگ معدنی و آلی تقسیم‌بندی کرد، ولی آلودگی‌های ناشی از دفع مواد زائد شهری نیز به‌عنوان یکی از آلاینده‌های بالقوه طبیعت آسیب‌هایی فراوان به زیست‌بوم وارد کرده است (۱۲). خاک آلوده افزون بر این‌که آلاینده‌ها را از راه چرخه غذایی وارد بدن انسان می‌کند، خود نیز می‌تواند به‌عنوان منبع آلودگی آب‌های زیر زمینی و آب آشامیدنی باشد. همچنین، خاک‌های آلوده، گستره استفاده از اراضی را محدود می‌سازند. آلاینده‌های مایع آلی نامحلول در آب (NAPL) از مهم‌ترین آلاینده‌های آلی زیست‌محیطی به‌شمار می‌آیند (۱۳).

چگالی آلاینده‌های مایع آلی نامحلول در آب تأثیر زیادی بر رفتار آن‌ها در محیط خاک می‌گذارند (۹). به همین دلیل، این آلاینده‌ها را بر پایه چگالی به دو گروه آلاینده‌های مایع آلی نامحلول سنگین‌تر از آب (DNAPL) و آلاینده‌های مایع آلی نامحلول سبک‌تر از آب (LNAPL) طبقه‌بندی می‌کنند (۱۰). مقاومت زیاد این ترکیبات در برابر فرآیندهای تجزیه‌پذیری (شیمیایی-زیستی)، خاصیت آب‌گریزی و همچنین سرطان‌زا بودن این ترکیبات از مهم‌ترین ویژگی‌های آن‌ها می‌باشد (۷، ۹، ۱۰). منشأ اصلی هیدروکربن‌های نفتی (NAPL) در طبیعت شامل زائادات ناشی از تولید نفت خام، زائادات ناشی از پالایش نفت خام، روغن‌های مصرف‌شده زائد مانند روغن ژنراتورها، نشت از مخازن نگهداری و لوله‌های انتقال می‌باشند (۱۴).

انسان به‌ندرت در معرض مستقیم هیدروکربن‌های نفتی قرار می‌گیرد. ولی این ترکیبات به محض رها شدن، به درون خاک نفوذ کرده و خود را به سفره‌های

آب زیرزمینی می‌رسانند و یا این‌که جذب ذرات خاک شده و در محیط خاک باقی‌مانده و یک منبع آلوده‌کننده دائمی برای خاک و آب به وجود می‌آورند (۱۵، ۵، ۴). پخشیدگی و توزیع NAPL‌ها در محیط‌های متخلخل به ویژگی‌های پدولوژیک منطقه همچون توزیع اندازه ذرات خاک و جرم ویژه خاک و نیز ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هیدروکربن‌ها بستگی دارد (۶).

قانون داری توسط پژوهشگران فراوانی به‌منظور ارزیابی جابه‌جایی سیالات مختلط با غلظت‌های بالا در محیط متخلخل مورد استفاده قرار گرفته است (۸، ۲). در این مطالعات، داده‌های آزمایشگاهی با ساده‌سازی قانون داری و در نظر گرفتن فرضیاتی از قبیل وجود مرزهای مشترک بین لایه‌های خاک حاصل شده است. سیالات مختلطی که امتزاج‌پذیر هستند و غلظت‌های زیادی دارند به‌صورت طبیعی در محیط وجود دارند و طی عملیات اکتشاف، ممکن است در محیط خاک قرار گیرند. برخی مطالعات نشان داده که جابه‌جایی سیالات در محیط خاک (جریان رو به بالا و یا رو به پایین) به ضریب پخشیدگی سیال در محیط بستگی داشته و سیالات با چگالی بیش‌تر پایدارترند. مطالعات دکار و ابرویلا (۲۰۰۰) نشان داده است که قانون داری می‌تواند توصیفی مطلوب از جریان NAPL‌ها در خاک را نشان دهد و رابطه زیر را برای چنین جریانی پیشنهاد کردند (۱):

$$\frac{\partial}{\partial t}[\phi s_{\beta} \rho_{\beta}] = \nabla \cdot [\rho_{\beta} \frac{kk_{r\beta}}{\mu_{\beta}} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} g \nabla z)] + Q_{\beta} \quad (1)$$

که در آن، β نوع سیال (ترکیب NAPL و آب)، ϕ تخلخل خاک، s_{β} درجه اشباع سیال، ρ_{β} چگالی سیال، k نفوذپذیری، $k_{r\beta}$ نفوذپذیری نسبی سیال، μ_{β} گرانشوی دینامیکی، P_{β} فشار سیال، ρ_{β} چگالی سیال و Q_{β} نسبت مقدار ترکیبات به مقدار نفوذ آن‌ها می‌باشد.

می‌گردد که نقش مهمی در انتقال و جابه‌جایی هیدروکربن‌ها دارند. NAPLها در خلال حرکت عمودی رو به پایین در محیط غیراشباع به واسطه نیروهای کشش سطحی مقداری پسماند از خود در خلل و فرج خاک باقی می‌گذارند.

ورود NAPLها به محیط‌های غیراشباع منجر به ایجاد سیالات چند فاز (Multi - phase fluid) می‌گردند که درجه اشباع خاک (Saturation)، نفوذپذیری ذاتی خاک (Intrinsic permeability) و فشار کاپیلاری از فاکتورهای مهم در جریان این سیالات می‌باشند (۹، ۱۰).

اطلاعات کمی در مورد انتقال NAPLها در خاک به منظور توصیف و پیش‌بینی نفوذ و رفتار هیدروکربن‌ها در خاک‌های مرطوب به اندازه کافی موجود نمی‌باشد. در حالی که این اطلاعات نقش مهمی در فهم مکانیسم‌های انتشار و نفوذ NAPLها در جهت اصلاح خاک‌های آلوده شده به NAPL و همچنین اقدامات مدیریتی به منظور جلوگیری از نفوذ این ترکیبات در سفره‌های آب زیرزمینی دارد. از طرفی در درازمدت تنها راه منطقی، پاکسازی خاک‌های آلوده می‌باشد. تنها با این روش است که مشکل آلودگی، بدون جابه‌جایی آلاینده به محل دیگر قابل حل است. به همین دلیل اطلاعات کمی نفوذ این ترکیبات به خاک نقشی کلیدی در ایجاد و بهینه کردن مدل‌های مفهومی و فیزیکی برای مدیریت در مناطق آلوده دارند. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی کمی نفوذ برخی مشتقات نفتی شامل نفت خام و نفت سفید به خاک بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، دو آلاینده مایع آلی نامحلول در آب شامل نفت خام و نفت سفید مورد بررسی قرار گرفتند. نفت خام عمدتاً از ترکیبات هیدروکربنی با

بدیهی است برای تعمیم این معادلات در شرایط دینامیکی باید نیروهای کنترل‌کننده و مؤثر بر جابه‌جایی سیال در مدل، در نظر گرفته شوند. نیروهای دینامیکی اعمال شده در رابطه ۱ شامل نیروهای ناشی از ثقل، فشار (F_p)، گرانشی سیال (F_μ)، کشش سطحی (F_s) و اینرسی می‌باشند.

با فرض این‌که سیالات تراکم‌ناپذیر باشند و با صرف‌نظر از وجود منبع و مصرف، حرکت سیالات در محیط‌های متخلخل از ترکیب معادلات اندازه حرکت و پیوستگی قابل توصیف است:

$$\phi \left(\frac{\partial S_w}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \{ K_{rw} K_w (\nabla h_w + \nabla z) \} \quad (2)$$

$$\phi \left(\frac{\partial S_o}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \{ K_{ro} K_o (\nabla h_o + \nabla z) \} \quad (3)$$

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

که در آن‌ها، ϕ تخلخل خاک، S_w و S_o درصد حجمی 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، h پتانسیل هیدرولیکی، ∇z بردار یکه در جهت کارتزینی z و i ، j و k به ترتیب بردارهای واحد در جهت‌های کارتزینی x ، y و z می‌باشند.

NAPLها هیدروکربن‌هایی هستند که وقتی در ارتباط با آب و یا هوا قرار می‌گیرند رفتاری مشابه یک فاز منفرد و مخلوط‌نشده از خود نشان می‌دهند و به محض ورود به خاک با آب برای اشغال نمودن منافذ رقابت می‌کنند (۱۱).

تفاوت در ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی آب و این ترکیبات منجر به تشکیل یک مرز فیزیکی (Interfacial Tension) بین NAPLها و آب

به کار می‌رود. این ماده دارای حدود ۹ تا ۱۶ اتم کربن است و بیش از ۸۰ درصد از آن شامل مواد و ترکیبات آلکانی می‌باشد. آزمون گرانیروی این ترکیبات در آزمایشگاه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد توسط دستگاه ویسکومتر SVM 3000 انجام شد. در جدول ۱، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آلاینده‌های مایع آلی نامحلول در آب ارائه شده است.

وزن مولکولی کم تا زیاد شامل متان، n-آلکان‌های آلیفاتیک، پنتان‌ها، هگزان‌ها، هپتان‌ها، پارافین‌های حلقه‌ای، ترکیبات حلقه‌ای دیگر شامل سولفور، نیتروژن و فلزات سنگین (۳-۰/۰۵ درصد) تشکیل شده است.

نفت سفید برشی از نفت خام است. این ماده هیدروکربنی اغلب به‌عنوان حلال، سوخت هیدروکربنی و ماده گرمابخش کارخانه‌ها و خانه‌های روستایی

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و آلاینده‌های مایع نامحلول در آب.

Table 1. Some physical and chemical properties of water and NAPLs.

| جرم ویژه density (gr cm ⁻³) | گرانیروی سینماتیکی Kinematic viscosity (cm ² s ⁻¹) | گرانیروی دینامیکی Dynamic viscosity (cm ² s ⁻¹) | رنگ Color | نقطه جوش Boiling point (°C) | فرمول مولکولی Molecular Formula | ANPL |
|---|---|--|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 0.8862 | 0.2735 | 0.2424 | قهوه‌ای تیره Dark brown | ≥40 | C ₄ -C ₄₀₀ | نفت خام Crude oil |
| 0.7911 | 0.0015 | 0.0012 | بی‌رنگ Colorless | 200-250 | C ₁₂ -C ₁₆ | نفت سفید Kerosene |

آزمایشگاه استفاده گردید که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

به‌منظور تعیین نوع و درصد ترکیبات موجود در نفت خام از روش کروماتوگرافی گازی (GC) در

جدول ۲- آزمون کروماتوگرافی نفت خام.

Table 2. Chromatography test of Crude oil.

| آروماتیک Aromatic | آلیفاتیک Aliphatic | آسفالتین Asphaltene | نیتروژن Nitrogen | سولفور Sulfur | سولفید هیدروژن Hydrogen sulfide | نمک Salt |
|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|------------------|------------------------------------|-------------|
| 10.5% | 54.9% | 16.8% | 1.7% | 2.1% | 0.68% | 14% |

سانتی‌متر و قطر داخلی ۹/۵ سانتی‌متر تهیه شد. انتهای سیلندرها توسط صفحه‌های متخلخل مسدود شدند (متناسب با تخلخل خاک ۴۴٪). سپس سیلندرها تا ارتفاع ۷۰ سانتی‌متری از خاک جمع‌آوری شده پر شدند. به‌منظور جلوگیری از ورود خاک به داخل منافذ کف سیلندر و مسدود کردن آن‌ها از شن شسته شده (حداکثر اندازه ۳ میلی‌متر) به ارتفاع ۳ سانتی‌متر در کف سیلندر استفاده شد. بار افتان ۸ سانتی‌متری از

خاک مورد استفاده در این پژوهش دارای بافت لوم‌شنی با ۱۲/۲٪ رس، ۲۱/۱٪ سیلت و ۶۶/۷٪ شن بود که از اطراف پالایشگاه نفت تهران تهیه شد. با توجه به این‌که دو فاز بودن محیط خاک مدنظر بود، پیش از قرار دادن خاک در سیلندرها آزمایشی، ابتدا خاک را هوا خشک نموده و به‌منظور افزایش یکنواختی، از الک ۵ میلی‌متری عبور داده شدند. سیلندرهایی از جنس پلکسی‌گلاس به طول ۸۰

که در آن، O_i ، P_i و n به ترتیب مقادیر مشاهده شده، برآورد شده و تعداد مشاهدات می باشند.

نتایج و بحث

منحنی شدت نفوذ NAPLها در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود، نفت خام و نفت سفید به محض این که بر روی خاک قرار می گیرند بی درنگ شروع به نفوذ می کنند. سرعت نفوذ برای تمام ترکیبات NAPL شباهت زیادی به نفوذ آب دارند. از این شکل می توان به خوبی استنباط کرد که نفوذ تجمعی برای تمام ترکیبات مشابه آب، با گذشت زمان به صورت غیرخطی افزایش می یابد. همچنین، سرعت نفوذ NAPLها با گذشت زمان، همانند آب کاهش می یابد. نفوذ اولیه این ترکیبات نسبتاً سریع بوده و این در حالی است که پیشروی نفوذ تجمعی در این زمان حداقل است. با گذشت زمان و افزایش طول جبهه رطوبتی سرعت نفوذ این ترکیبات کاهش یافته و سرانجام به مقداری ثابت می رسد.

در زمانهای اولیه، نفوذ NAPLها تحت تأثیر دو نیروی ثقل و ماتریک می باشد. با توجه به این که خاک هوا خشک است، در ابتدا خاک تمایل بیشتری برای جذب این ترکیبات از خود نشان می دهد. به بیان دیگر پتانسیل ماتریک در زمانهای اولیه نفوذ نقش بیشتری ایفا می کند و در نتیجه، سرعت نفوذ افزایش می یابد. با گذشت زمان، مقدار پتانسیل ماتریک خاک کاهش یافته و مقدار نیروی لازم به منظور غلبه بر مقاومت های ناشی از ویژگی های NAPLها (گرانروی، کشش سطحی، چگالی) و جذب سطحی این ترکیبات بر روی ذرات خاک که منجر به کاهش اندازه خلل و فرج خاک می شوند، افزایش می یابد. بنابراین نفوذ این ترکیبات به اعماق پایین تر، نیروی بیشتری نیاز داشته و نهایتاً سرعت نفوذ این ترکیبات کاهش می یابد.

ترکیبات هیدروکربنی مختلف بر روی ستون خاک اعمال گردید و زمانهای مختلف تغییر عمق هیدروکربنها اندازه گیری شد. سپس با استفاده از رابطه زیر پارامترهای مدل نفوذ فیلپ به دست آمد:

$$I = St^{0.5} + At \quad (5)$$

که در آن، I عمق سیال نفوذ یافته از شروع آزمایش (cm)، S ضریب جذبی یا Sorptivity (cm/ $\sqrt{\text{min}}$)، t زمان (min) و A سرعت نفوذ پایه به خاک می باشد.

به منظور اندازه گیری هدایت هیدرولیکی اشباع از قانون دارسی که به صورت زیر نوشته می شود، استفاده گردید. برای این کار، بار ثابت ۵ سانتی متری بروی سیلندرها برقرار گردید.

$$K_s = \frac{V}{t * A} * \frac{L}{\Delta\phi} \quad (6)$$

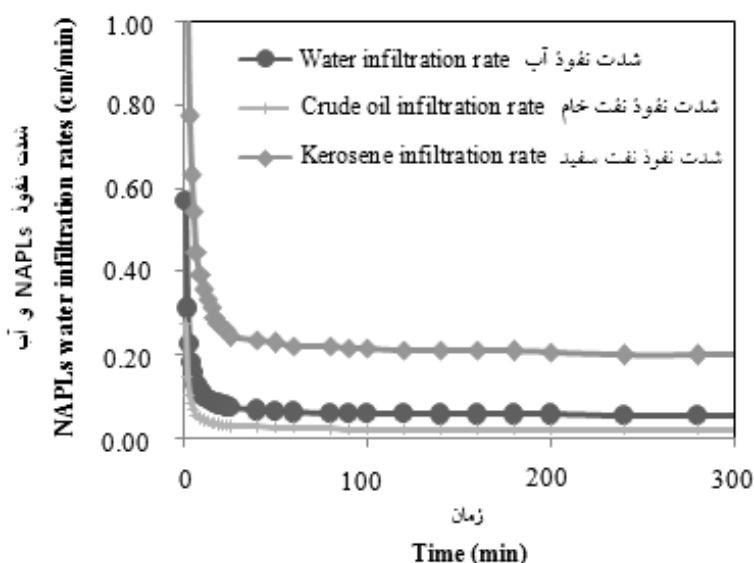
که در آن، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع سیال (cm/min)، v حجم سیال خروجی در زمان مشخص (cm³)، t زمان (min)، A سطح مقطع سیلندر (cm²) و L طول ستون خاک (cm) و $\Delta\phi$ اختلاف پتانسیل هیدرولیکی می باشد.

به منظور ارزیابی کمی تخمین های حاصل از مدلها، از آماره های ریشه میانگین مربعات خطا (Root Means Square Error) و ضریب تبیین (Coefficient of Determination) استفاده شد. مقادیر RMSE نشانگر مقدار خطای مدل در برآورد داده ها است و حد پایین آن صفر می باشد (۹). اگر مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده مدل با یکدیگر برابر باشند RMSE=0 است. شرح ریاضی آماره RMSE به صورت زیر می باشد (۳):

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (7)$$

این امر، گرانبوی زیاد این ترکیب در مقایسه با نفت سفید است به‌طور کلی، هنگامی که نفت خام در محیط متخلخل قرار می‌گیرد، به تله افتادن آن در منافذ ریز خاک، باعث بلوکه شدن این منافذ و کاهش تخلخل مؤثر در جریان می‌شود. بسته شدن برخی از منافذ ریز خاک باعث افزایش جریان در تخلخل درشت خاک شده و ایجاد نوعی جریان ترجیحی می‌نماید.

بیش‌ترین نرخ نفوذ مربوط به نفت سفید (kerosene) است که علت آن گرانبوی کم این ترکیب در مقایسه با نفت خام می‌باشد. داده‌های ارائه شده در جدول ۱ به‌خوبی این موضوع را تأیید می‌کنند. در شکل ۱ روند این تغییرات به‌خوبی نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، کم‌ترین سرعت نفوذ هم به نفت خام تعلق دارد. علت اصلی



شکل ۱- مقایسه شدت نفوذ NAPLها با آب.

Figure 1. Comparison of NAPLs and water infiltration rates.

خام و از طرفی بالا بودن جذب سطحی آب به دلیل ماهیت دو قطبی خود نرخ نفوذ آن‌ها با یکدیگر اختلاف دارد ولی این تفاوت بسیار چشم‌گیر نمی‌باشد.

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، سرعت نفوذ پایه (A) و ضریب جذبی سیال (S) برای همه NAPLها و آب به‌ترتیب با استفاده از قانون داریسی، مدل فیلیپ، مدل گرین-امپت و مدل کوستیاکوف تعیین و در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه هدایت هیدرولیکی اشباع هر کدام از NAPLها با سرعت نفوذ پایه به‌دست آمده از مدل فیلیپ (A) نشان

جرم ویژه نفت خام در مقایسه با آب کم‌تر است، به همین دلیل شدت نفوذ آن نسبت به آب نیز کم‌تر است. زیرا، گرانبوی نفت خام بیش‌تر از آب است. با توجه به معادله یانگ-لاپلاس ($\phi_m = \frac{-2\sigma}{r}$) و با در نظر گرفتن رابطه مستقیم کشش سطحی و پتانسیل ماتریک خاک انتظار می‌رود با کاهش کشش سطحی سیال، مقدار کم‌تری نیروی مکش برای خارج کردن سیال لازم باشد. از طرفی انتظار می‌رود با توجه به این‌که گرانبوی نفت خام ۲۷ برابر آب است، نفوذ آن‌ها تفاوت چشم‌گیری با یکدیگر داشته باشد. ولی به‌دلیل بیش‌تر بودن کشش سطحی آب نسبت به نفت

می‌باشد و در حقیقت نیروی بازدارنده حرکت است. بنابراین گرانیروی زیاد سیالات بیانگر اصطکاک و مقاومت بیش‌تر در برابر جریان می‌باشد (۱۳). از آن‌جا که گرانیروی آب کم‌تر از نفت سفید و بیش‌تر از نفت خام است، سرعت نفوذ آن در خاک از نفت خام بیش‌تر و از نفت سفید کم‌تر می‌باشد.

می‌دهد که در مدل فیلیپ مقدار پارامتر A برای نفت خام و نفت سفید به ترتیب ۱/۱۰ و ۱/۴ برابر هدایت هیدرولیکی اشباع داری می‌باشد. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای نفت سفید بیش‌تر از آب و برای نفت خام کم‌تر از آب می‌باشد. طبق تعریف، گرانیروی بیانگر نیروی اصطکاک بین لایه‌های سیال در حال جریان

جدول ۳- هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامترهای نفوذ برای NAPLها و آب بر مبنای مدل‌های فیلیپ، گرین-امپت و کوستیاکوف.

Table 3. Saturated hydraulic conductivity and infiltration parameters of NAPLs and water based on Philip, Green-Ampt and Kostikov models.

| مدل نفوذ Infiltration model | پارامتر Parameter | NAPLs | | آب Water |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| | | نفت خام Crude oil | نفت سفید Kerosene | |
| داری Darcy | K_s | 0.0058 | 0.280 | 0.061 |
| گرین-امپت Green- Ampt | A | 0.004589 | 0.049 | 0.078 |
| | B | 0.06685 | 0.145 | 0.1435 |
| | H_f | 11.520 | 0.510 | 2.350 |
| فیلیپ Philip | A | 0.00579 | 0.063 | 0.0298 |
| | S | 0.1291 | 0.306 | 0.1837 |
| کوستیاکوف Kostiakov | a | 0.147 | 1.900 | 0.186 |
| | b | 0.550 | 0.340 | 0.648 |

جدول ۴- سرعت نفوذ پایه و هدایت هیدرولیکی NAPLها و آب.

Table 4. Basic intake rate and hydraulic conductivity of NAPLs and water.

| آب Water | NAPLs | | پارامتر Parameter |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | نفت سفید Kerosene | نفت خام Crude oil | |
| 0.024 | 0.08 | 0.01 | I_{max} cm/min |
| 0.029 | 0.0063 | 0.00579 | K |

اواخر نفوذ، ضریب جذبی خاک (S) تأثیر به‌سزایی بر فرآیند نفوذ این ترکیبات در خاک دارد. این در حالی است که در مورد آب، هنگامی که زمان به‌سمت بی‌نهایت میل می‌کند، سرعت نفوذ با هدایت هیدرولیکی

برای ترکیبات NAPL، هنگامی که زمان به‌سمت بی‌نهایت میل می‌کند، شدت نفوذ آن‌ها با هدایت هیدرولیکی اشباع این ترکیبات برابری نمی‌کند. این موضوع بیانگر آن است که در مورد این ترکیبات در

به کار برده شده، صحت و اعتبار آن با تطابق دادن مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده مورد سنجش قرار گرفت. نتایج این داده‌ها در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

تقریباً برابری کرده و به عبارتی در اواخر فرآیند نفوذ، ضریب جذبی خاک که بیانگر تمایل محیط به جذب سیال است ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. پارامترهای مدل فیلیپ، کوستیاکوف و گرین-امپت با کمک نرم‌افزار MATLAB به دست آمد. برای ارزیابی مدل

جدول ۵- مدل‌های نفوذ نفت خام به خاک و ضرایب آن‌ها.

Table 5. Infiltration models of Crude oil and their parameters.

| ضرایب مدل Model parameters | معادله نفوذ مدل Infiltration model | مدل Model |
|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| $i = (0.147)(0.55)t^{(0.55-1)}$ | $i = abt^{b-1}$ | کوستیاکوف Kostiakov |
| $i = 0.004589 + \frac{0.06685}{L}$ | $i = A + \frac{B}{L}$ | گرین-امپت Green-Ampt |
| $i = 0.1291t^{0.5} + 0.00579$ | $i = St^{0.5} + A$ | فیلیپ Philip |

جدول ۶- مدل‌های نفوذ نفت سفید به خاک و ضرایب آن‌ها.

Table 6. Infiltration models of Kerosene and their parameters.

| ضرایب مدل Model parameters | مدل نفوذ Infiltration model | مدل Model |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| $i = (1.9)(0.34)t^{(0.34-1)}$ | $i = abt^{b-1}$ | کوستیاکوف Kostiakov |
| $i = 0.049 + \frac{0.145}{L}$ | $i = A + \frac{B}{L}$ | گرین-امپت Green-Ampt |
| $i = 0.306t^{0.5} + 0.063$ | $i = St^{0.5} + A$ | فیلیپ Philip |

در خاک لوم‌شنی به خوبی برآورد می‌کند. به نظر می‌رسد مدل کوستیاکوف برآورد بهتر و دقیق‌تری از نفوذ نسبت به دو مدل گرین-امپت و فیلیپ ارائه می‌نماید.

نتایج حاصل از ارزیابی کمی مدل‌های نفوذ در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل گرین-امپت نسبت به دو مدل کوستیاکوف و فیلیپ برآورد بهتری از نفوذ نفت خام به خاک داشته است. همچنین مدل کوستیاکوف نفوذ نفت سفید را

جدول ۷- نتایج ارزیابی کمی اعتبار مدل‌های برازش داده شده بر مقادیر اندازه‌گیری شده NAPLها.

Table 7. Quantitative evaluation validity of fitted models on measured NAPLs values.

| آلاینده Contamination | مدل نفوذ Infiltration model | R ² | RMSE |
|--------------------------|--------------------------------|----------------|-------|
| | گرین - امپت Green-Ampt | 0.99 | 0.164 |
| نفت خام Crude oil | کوستیاکوف Kostiakov | 0.98 | 3.311 |
| | فیلیپ Philip | 0.97 | 0.488 |
| | گرین - امپت Green-Ampt | 0.97 | 1.02 |
| نفت سفید Kerosene | کوستیاکوف Kostiakov | 0.99 | 0.41 |
| | فیلیپ Philip | 0.73 | 5.286 |

نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی کمی فرآیند نفوذ نفت خام به خاک بر پایه آماره‌های مورد استفاده نشان داد که برای ترکیبات NAPLs هنگامی که زمان به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، شدت نفوذ پایه آن‌ها با هدایت هیدرولیکی اشباع این ترکیبات برابر نیست. زیرا در اواخر نفوذ، ضریب ثابت (S) تأثیر زیادی بر نفوذ این ترکیبات به خاک دارد. همچنین با توجه به این که گرانشی به‌عنوان نیروی اصطکاک حرکت سیال در خاک عمل می‌کند، شدت نفوذ نفت خام نسبت به نفت سفید و آب کم‌تر است. به دلیل کشش سطحی کم‌تر نفت سفید نسبت به آب و نیز لزوجت سینماتیکی بیش‌تر از آب در محیط خاک، میزان نگهداشت آن در خاک کم‌تر بوده و در نهایت نرخ

نفوذ آن از آب بیش‌تر است. میزان نفوذ NAPLها با یکسان فرض کردن محیط خاک به عواملی هم‌چون نوع NAPL، نوع ترکیب سیال، گرانشی، کشش سطحی و چگالی سیال نیز بستگی دارد و برآیندی از همه این ویژگی‌ها، شدت نفوذ یک سیال به درون خاک را تعیین می‌کند. همچنین مشخص شد که میزان Ks با A برابر نبوده و این نسبت برای ترکیبات مختلف با لحاظ نمودن نوع ترکیب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها متفاوت است. نتایج اعتبارسنجی مدل‌های نفوذ نشان می‌دهد که بر مبنای مقدار RMSE، کارایی مدل گرین-امپت و کوستیاکوف به ترتیب در برآورد میزان نفوذ نفت خام و نفت سفید از مدل‌های دیگر بهتر است.

منابع

1. Dekker, T.J., and Abriola, L.M. 2000. The influence of field-scale heterogeneity on the infiltration and entrapment of dense nonaqueous phase liquids in saturated formations. *J. Contam. Hydrol.* 42: 187-218.
2. Farrokhian Firouzi, A., Homaei, M., Klumpp, E., Kasteel, R., and Sattari, M. 2012. Modeling Microbial Contaminant Transport and Deposition in Calcareous Soils under Saturated Conditions. *J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water Soil Sci.* 15: 58. 53-69. (In Persian)
3. Homaei, M., Dirksen, C., and Feddes, R.A. 2002. Simulation of root water uptake. I. Nonuniform transient salinity stress using different macroscopic reduction functions. *Agr. Water Manage.* 57: 2. 89-109.
4. Hu, L.M., Lo, I.M.C., and Meegoda, J.N. 2006. Numerical analysis and centrifugal modeling of LNAPLs transport in subsurface system. *Prog. Nat. Sci.* 16: 4. 416-424.
5. Kechavarzi, C., Soga, K., and Illangasekare, T.H. 2005. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadoze zone. *J. Contam. Hydrol.* 76: 3-4. 211-233.
6. Khomehchiyan, M., Charkhabi, A.H., and Tajic, M. 2007. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Eng. Geol.* 89: 1-4. 220-229.
7. Liang-Cheng, C., Hung-Hui, C., Hsin-Yu, S., and Jui-Pin, T. 2009. Effect of connectivity and wettability on the relative permeability of NAPL. *Environ. Geol.* 56: 7. 1437-1447.
8. Mahmoodi, M.A., Shorafa, M., Homaei, M., Liaghat, A.M., and Abbasi, F. 2011. Estimation of Equilibrium Convection-Dispersion Equation Parameters from Soil Hydraulic Data. *Iran. J. Soil Water Res.* 42: 2. 241-248. (In Persian)
9. Nouri, M., Homaei, M., and Bybordi, M. 2012. Parametric assessment of soil hydraulic functions at presence of Kerosene contaminant. *J. Soil Water Resour. Cons.* 2: 1. 37-48. (In Persian)
10. Nouri, M., Homaei, M., and Bybordi, M. 2013. Parametric assessment of soil retention at presence of petroleum in three-phase system. *J. Soil Water Resour. Cons.* 2: 2. 15-24. (In Persian)
11. Nouri, M., Homaei, M., and Bybordi, M. 2014. Parametric Investigation of Diesel Fuel-Air Capillary Pressure-Saturation Functions. *Iran. J. Soil Water Res.* 44: 4. 365-372. (In Persian)
12. Nouri, M., Homaei, M., and Bybordi, M. 2014. Comparing Petroleum and Water Hydraulic Properties in Soil. *J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water Soil Sci.* 17: 66. 123-134. (In Persian)
13. Nouri, M., Homaei, M., and Bybordi, M. 2014. Quantitative assessment of LNAPLs retention in soil porous media. *Soil Sediment Contam.* 23: 8. 801-819.
14. Wipfler, E.L., Van Dije, M.I.J., and Van Der Zee, S.E.A.T.M. 2004. Three-phase flow of dense nonaqueous phase liquid infiltration in horizontally layered porous media. *Water resour. Res.* 40: 10. 47-60.
15. Zhu, J. 2001. Transport and fate of nonaqueous phase liquid (NAPL) in variably saturated porous media with evolving scales of heterogeneity. *Stoch. Env. Res. Risk A.* 15: 6. 447-461.



Parametric assessment of infiltration of some NAPLs in soil porous media

E. Jafari Hafshjani¹, S. Asadi Kapourchal², *M. Homae³ and M. Bybordi⁴

¹M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Tarbiat Modares University, ²Assistant Prof., Dept. of Soil Science, University of Guilan, ³Professor, Dept. of Irrigation and Drainage, Tarbiat Modares University, ⁴Professor, Dept. of Soil Science, Tarbiat Modares University

Received: 03/13/2016; Accepted: 09/24/2016

Abstract

Background and Objectives: Environmental contamination particularly soil pollution is a major recent challenge. The so-called non-aqueous phase liquids (NAPLs) are considered among the most hazardous pollutants in environment and can potentially cause severe damage to our environment. The contaminated soils might not only transfer the pollutants to the human chain food, but transmit the contaminants to the groundwater and drinking water. Non-aqueous phase liquids (NAPLs) have significant influences on environmental contaminations. Understanding infiltration characteristics of these compounds into the soils is very important because it assists to remediate contaminated soils and manage to reduce NAPL recharge into groundwater. The main objective of this research was to quantitatively investigate the influence of infiltration of some NAPLs including crude oil and kerosene into soil.

Materials and Methods: Consequently, the required soil samples were collected from neighboring Tehran oil refinery. The saturated hydraulic conductivity, cumulative infiltration and the infiltration rates were obtained by using Darcy's law and Philip, Kostiakov and Green-Ampt infiltration models, respectively. The performance of predictive infiltration models were evaluated using RMSE and R² statistics.

Results: The obtained results showed that similar to water, the wetting front length and cumulative infiltration for both examined NAPL components were nonlinearly increased. The largest NAPLs infiltration rates as well as that of water were observed during the initial experimental periods. The hydraulic conductivity of crude oil and kerosene were obtained to be 0.0058, 0.280 cm min⁻¹, respectively.

Conclusion: Quantitative assessment of kerosene infiltration into the soil indicated that for NAPLs, when time moves towards infinity, the basic infiltration rate doesn't resemble the soil saturated hydraulic conductivity. This can be attributed to the fact that at the final stage of infiltration process, the sorptivity plays a significant role in infiltration of these components. Overall observations show that that based on the calculated RMSE statistic, the Green-Ampt and Kostiakov models can well predict the NAPLs infiltration into the soil. Some NAPL characteristics including type of compounds, composition, surface tension, viscosity and specific gravity were appeared to significantly influence the infiltration process.

Keywords: Darcy's law, Infiltration models, NAPL, Saturation hydraulic conductivity, Soil contamination

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

