



مدلسازی پخشیدگی آلودگیهای نفتی در حین پاکسازی به روش تخلیه دو پمپه

محسن سعادت^۱، حمید رضا صفوی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

mohsen2000@cv.iut.ac.ir

خلاصه

تا کنون روشهای متنوعی برای پاکسازی آبهای زیرزمینی از آلودگیهای نفتی به کار رفته است. با توسعه این روشها، در سالهای اخیر محققان همواره به دنبال بهینه سازی این روشها بوده اند و موفقیتهایی نیز حاصل شده است. از جمله جدیدترین این روشها می توان به تکنولوژی تخلیه دو پمپه اشاره کرد که یک رابطه تحلیلی برای بهینه سازی این روش ارائه شده است. رابطه ارائه شده برای حالت دائمی و تنها برای یک چاه پاکسازی می باشد. در این مقاله مدلسازی پخشیدگی آلودگی برای حالتی غیردائمی و نیز سیستم چند چاهی بررسی و کاربرد آن در منطقه آلوده اطراف پالایشگاه اصفهان نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: آبهای زیرزمینی، آلودگیهای نفتی، پاکسازی، بهینه سازی، شبیه سازی

مقدمه

با توسعه سریع صنعت به ویژه صنایع نفتی در دهه های اخیر، مساله آلودگی آبهای زیرزمینی در مجاورت آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار شده است. این مساله به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک که محدودیت دسترسی به آبهای سطحی مناسب دارند، بیشتر جلوه کرده و حفاظت کیفی از منابع محدود آب زیرزمینی را به عنوان الزامی در مدیریت منابع آب منطقه ایجاد می نماید. هر چند به دلیل دور از دسترس بودن منابع آب زیرزمینی نسبت به آبهای سطحی، احتمال آلودگی آنها کمتر است، ولی در عوض احیاء آبهای زیرزمینی آلوده نیز بسیار طولانی و پرهزینه است. آلاینده های آب زیرزمینی به دو گروه عمده محلول و نامحلول در آب تقسیم بندی می گردند. از میان آلودگیهای محلول می توان به نمک و از میان آلاینده های نامحلول به نفت اشاره کرد. در مورد آلاینده های محلول در آب چون که پیش بینی جریان و رفتار آنها به مراتب ساده تر از آلاینده های نامحلول است، بررسی های بیشتری تاکنون انجام گرفته و مدل های مناسبی جهت پیش بینی رفتار آنها در آبهای زیرزمینی ارائه شده است و اما آلاینده های نامحلول که قسمت اعظم مشتقات نفتی را شامل می شوند از مدلهایی با درجه اطمینان کمتر برخوردار بوده و با احتیاط بیشتری باید با آنها برخورد شود. شایان ذکر است این مواد نامحلول در آب خود به دو گروه با چگالی کمتر (LNAPLs) یا بیشتر از آب (DNAPLs) تقسیم بندی می گردند. شایان ذکر است که همه مواد LNAPL با وجود چگالی کمتر از آب همیشه بر روی آب شناور نمی مانند [۱]. در این تحقیق LNAPL هایی مورد نظر هستند که بر روی آب به صورت شناور باقی مانده و در آب مستغرق نمی شوند. در مجموع آلودگی آبهای زیرزمینی با این مواد بسیار شایع بوده و هم کشورهای در حال توسعه و هم کشورهای توسعه یافته را متاثر ساخته است، به طوریکه در ایران هم، آبهای زیر زمینی در مناطق زیادی که عمدتاً در مجاورت پالایشگاهها، مخازن و خطوط انتقال هستند با این مواد آلوده شده اند.

روشهای مختلفی برای پاکسازی آبهای زیرزمینی از LNAPL ها به وجود آمده اند که از بین آنها روش تخلیه دو پمپه به عنوان یکی از جدیدترین و کارا ترین این تکنولوژیها مطرح است [۲]. این تکنولوژی بر پایه استفاده همزمان از دو پمپ تخلیه در یک چاه (یک پمپ درون آب و دیگری داخل نفت) استوارگشته است. در ابتدا پمپ اول که داخل آب قرار دارد شروع به پمپاژ کرده، بر اثر ایجاد مخروط افت یک گرادیان هیدرولیکی به آلاینده های نفتی اعمال می شود که باعث تجمع آلاینده ها در مخروط افت و در نتیجه بالا رفتن راندمان پمپ نفت و افزایش مقدار نفت خروجی می گردد. نکته ای که بایستی به آن توجه داشت، آنست که در صورتی که دبی پمپهای نفت و آب به طور اصولی انتخاب شوند این تکنولوژی بازده بالایی دارد، ولی در صورت

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد

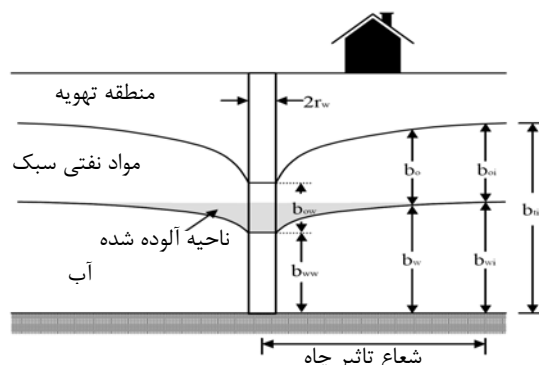
^۲ استادیار

انتخاب مقادیر غیر صحیح برای این دبی ها، این تکنولوژی می تواند باعث پخش شدن بیشتر آلاینده ها شود. در سالهای اخیر محققان همواره به دنبال یافتن رابطه ای بین دبی این پمپها بوده اند به گونه ای که بیشترین نرخ پمپاژ را با شرط عدم پخش بیشتر آلودگی پیدا کنند. در این راستا جونز و همکارانش یک روش تحلیلی با فرضیات ساده کننده در حالت جریان دائمی ارائه کرده اند [۳]. در این مقاله با شبیه سازی تکنولوژی تخلیه دو پمپه، برقراری شرایط عدم پخش آلودگی ها را در حالت گذرا (در حین پمپاژ) و نیز برای وقتی که شعاع تاثیر چاههای پاکسازی با یکدیگر تداخل دارند بررسی می شود. لذا براین اساس می توان ارتباط کاملی بین دبی پمپهای آب و نفت برای جلوگیری از پخشیدگی بیشتر آلودگی در عملیات پاکسازی (در حالت کلی جریان گذرا و سیستم چند چاهی) تعیین کرد که به نوبه خود از اهمیت بسزایی در پروژه های پاکسازی آبهای زیرزمینی برخوردار است.

تکنولوژی مناسب برای پاکسازی آبهای زیرزمینی از مواد نفتی

در روش پایین آوردن سطح آب با استفاده از پمپاژ، یک مخروط افت برای ایجاد گرادینان جهت بازیابی LNAPL ها به سمت چاه ایجاد می شود که برای LNAPL های متحرک و هاله آلودگی متحرک یا ثابت مناسب می باشد. این روش در خاکهای با نفوذپذیری زیاد مناسب تر است و معمولاً بیشتر از یک سال طول می کشد. به طور کلی این تکنولوژی پاکسازی شامل دو روش تک پمپه و دو پمپه است. در روش تک پمپه آب و LNAPL ها به صورت توام و به صورت یک مخلوط امولسیون بازیابی می شوند، درحالیکه در روش دو پمپه آنها به صورت جدا بازیابی می شوند. معمولاً در این روش یک چاه با قطر ۴ اینچ کافی به نظر می رسد [۴]. روش تک پمپه نصب راحت تری دارد و کنترل کمتری نیز لازم دارد، ولی در عوض نیاز به تصفیه های تکمیلی جهت جداسازی نفت از امولسیون پمپاژ شده دارد. انتخاب هرکدام از این دو روش پاکسازی وابسته به اهداف پاکسازی است. به طور کلی در این روشها دو هدف متفاوت دنبال می شود. (۱) بیشینه کردن نرخ پاکسازی و (۲) بیشینه کردن حجم LNAPL های پاکسازی شده و کنترل پخش آلاینده ها. در ضمن این روشها برای پاکسازی LNAPL های آزاد بوده و نمی توان از آنها برای برداشت LNAPL های در تله افتاده در خاک استفاده نمود [۵]. نکته حائز اهمیت دیگر آنست که منظور از پخش آلاینده ها تبدیل LNAPL های آزاد به LNAPL های ماندگار می باشد. همچنین LNAPL های ماندگار به آلاینده های نفتی سبکی گفته می شود که توسط نیروهای موینگی بین حفرات خاک محصور شده و امکان جریان آزادانه برای آنها وجود ندارد [۶]. بایستی توجه داشت که همواره LNAPL های آزاد با سهولت و هزینه کمتری نسبت به LNAPL های ماندگار قابل بازیابی می باشند، به همین جهت در حین پاکسازی مواد LNAPL ها همواره سعی بر آنست تا از تبدیل شدن آنها به آلاینده های ماندگار که به شدت تحت تاثیر نیروهای موینگی بوده و پاکسازی آنها در بسیاری از موارد غیرممکن است جلوگیری شود.

برای بیشینه کردن حجم پاکسازی حداقل افت هیدرولیکی لازم است چون LNAPL های ماندگار کمتری ایجاد شده و باعث پخش آلودگی کمتری می شود، ولی در عوض نرخ پاکسازی کاهش می یابد. در مقابل افت هیدرولیکی زیاد نرخ بازیابی را بیشتر کرده ولی به علت بزرگ شدن مخروط افت، منطقه بیشتری آلوده شده و آب بیشتری هم همراه LNAPL ها پمپاژ می شود که باعث افزایش هزینه های تصفیه می گردد. در کل روشهای تک پمپه و دوپمپه بر حسب تصفیه آبی که همراه نفت پمپاژ شده است، هزینه کم تا متوسطی در بر دارند [۵]. در مورد آلودگیهای نفتی سبکتر از آب، به وضوح تخلیه دوپمپه (به شرط داشتن کنترلهای لازم) نتایج بهتری به دنبال دارد، به همین دلیل اخیراً از این تکنولوژی به طور گسترده ای برای پاکسازی استفاده می شود. در شکل شماره (۱) شمایی کلی از این روش نشان داده شده است.



شکل ۱ - جزئیات پاکسازی به روش تخلیه دو پمپه

شبیه سازی کمی - کیفی فرآیند پاکسازی

در انتخاب یک شبیه ساز مناسب برای مدلسازی روش پاکسازی (شبیه سازی روند پاکسازی آلاینده های نفتی غیرمحلول سبک (LNAPLs) از آبهای زیر زمینی آلوده) پارامترهای زیادی موثر هستند که از جمله مهمترین آنها جامع بودن مدل و امکان شبیه سازی دقیق با آن می باشد. به این ترتیب مدل مورد نظر بایستی جزء مدلهای عددی باشد، چون مدلهای تحلیلی (مدلهایی که دارای حل دقیق هستند)، تنها در سطح غربالگری و مراحل اولیه کار قابل استفاده هستند. مدلهای عددی نیز به نوبه خود متنوع بوده و با توجه به نیازهای مساله بایستی یکی از آنها انتخاب شود. با توجه به اینکه در مساله حاضر شبیه سازی کمی و کیفی آبهای زیرزمینی هردو مورد نیاز می باشد، بهتر است مدل انتخاب شده این دو قابلیت را داشته باشد. همچنین مدل



انتخابی بایستی قادر به شبیه سازی تکنولوژی پاکسازی انتخاب شده (تکنولوژی تخلیه دوپیمه) نیز باشد. با بررسی انجام گرفته مدل UTCHEM به عنوان مناسبترین مدل جهت مرحله شبیه سازی انتخاب شده است. این مدل یک شبیه ساز سه بعدی بوده و حل معادلات آن با استفاده از روش تفاضلات محدود (فشار به صورت ضمنی و غلظتها به صورت صریح) می باشد. این مدل ابتدا در سال ۱۹۷۸ توسط پوپ و نلسون^۱ برای شبیه سازی بازیابی مواد نفتی با استفاده از مواد شوینده^۲ و فرآیندهای پلیمری توسعه داده شد. در سال ۱۹۹۰ بویان و همکارانش^۳ این مدل را برای فرآیندهای شیمیایی و گستره ای از واکنشهای زمین شیمیایی بین فاز آبی و مواد جامد توسعه دادند. در این مدل معادلات شبیه سازی جریان و انتقال آلاینده ها برای هر تعداد از اجزاء شیمیایی (آب، آلاینده آلی، مواد شوینده، الکلهای و...) قابل حل هستند. این اجزاء می توانند حداکثر در چهار فاز سیال (هوا، آب، ماده نفتی و مایکرومولسیون) و هر تعداد ماده جامد، بسته به ترکیب کلی قرار داشته باشند. این مدل قابلیت شبیه سازی جریانهای دائمی و نادرستی، انتقال جرم به صورت سه بعدی در ناحیه اشباع و غیر اشباع را دارا است. همچنین این مدل قابلیت شبیه سازی تغییرات خواص سیال در حین عملیات پاکسازی و نیز ناهمگنی های آبخوان را نیز داراست. دقت حلهای عددی این مدل از طریق یک سری مقایسه ها با داده های تجربی، مدلهای تحلیلی و نیز داده های میدانی ارزیابی شده است. آخرین ویرایش این مدل کامپیوتری، ویرایش ۹.۳ می باشد که به سفارش سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا^۴ و توسط دانشگاه تکزاس درآستین توسعه داده شده است [۷]. این مدل برای شبیه سازیهای خود متکی به دو معادله اصلی (۱) بقای جرم و (۲) فشار می باشد که فرم دیفرانسیلی مورد استفاده این معادلات به شرح زیر می باشد. پارامترهای مورد استفاده در این روابط و همچنین بعد هر پارامتر در جدول شماره ۱ آورده شده است.

• معادله بقای جرم و اجزای آن عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \tilde{C}_\kappa \rho_\kappa) + \bar{\nabla} \cdot \left[\sum_{\ell=1}^{n_p} \rho_\kappa (C_{\kappa\ell} \bar{u}_\ell - \bar{D}_{\kappa\ell}) \right] = R_\kappa \quad (1)$$

$$\tilde{C}_\kappa = \left(1 - \sum_{\kappa=1}^{n_{cv}} \hat{C}_\kappa \right) \sum_{\ell=1}^{n_p} S_\ell C_{\kappa\ell} + \hat{C}_\kappa \quad \text{for } \kappa = 1, \dots, n_c \quad (2)$$

$$\rho_\kappa = 1 + C_\kappa^0 (P_R - P_{R0}) \quad (3)$$

$$\bar{D}_{\kappa\ell, x} = \phi S_\ell \bar{K}_{\kappa\ell} \cdot \bar{\nabla} C_{\kappa\ell} \quad (4)$$

$$\bar{K}_{\kappa\ell ij} \equiv \frac{D_{\kappa\ell}}{\tau} \delta_{ij} + \frac{\alpha_{T\ell}}{\phi S_\ell} |\bar{u}_\ell| \delta_{ij} + \frac{(\alpha_{L\ell} - \alpha_{T\ell}) u_{\ell i} u_{\ell j}}{\phi S_\ell |\bar{u}_\ell|} \quad (5)$$

$$|\bar{u}_\ell| = \sqrt{(u_{x\ell})^2 + (u_{y\ell})^2 + (u_{z\ell})^2} \quad (6)$$

$$\bar{u}_\ell = -\frac{k_{r\ell} \bar{k}}{\mu_\ell} \cdot (\bar{\nabla} P_\ell - \gamma_\ell \bar{\nabla} h) \quad (7)$$

$$R_\kappa = \phi \sum_{\ell=1}^{n_p} S_\ell r_{\kappa\ell} + (1 - \phi) r_{\kappa s} + Q_\kappa \quad (8)$$

• معادله فشار و اجزای آن نیز عبارتند از:

$$\phi C_t \frac{\partial P_1}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \bar{k} \cdot \lambda_{rTc} \bar{\nabla} P_1 = -\bar{\nabla} \cdot \sum_{\ell=1}^{n_p} \bar{k} \cdot \lambda_{r\ell c} \bar{\nabla} h + \bar{\nabla} \cdot \sum_{\ell=1}^{n_p} \bar{k} \cdot \lambda_{r\ell c} \bar{\nabla} P_{c\ell} + \sum_{\kappa=1}^{n_{cv}} Q_\kappa \quad (9)$$

$$\sum_{\kappa=1}^{n_{cv}} C_{\kappa\ell} = 1 \quad (10)$$

$$\lambda_{r\ell c} = \frac{k_{r\ell}}{\mu_\ell} \sum_{\kappa=1}^{n_{cv}} \rho_\kappa C_{\kappa\ell} \quad (11)$$

$$\lambda_{rTc} = \sum_{\ell=1}^{n_p} \lambda_{r\ell c} \quad (12)$$

¹ Pope and Nelson

² Surfactant

³ Bhuyan et al.

⁴ US EPA



$$C_t = C_r + \sum_{\kappa=1}^{n_{CV}} C_{\kappa}^0 \tilde{C}_{\kappa} \quad (13)$$

$$\phi = \phi_R [1 + C_r (P_R - P_{R0})] \quad (14)$$

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در معادلات پایه شبیه ساز

پارامتر	معرفی پارامتر	دیمانسیون
n_{CV}	تعداد کل اجزاء اشغال کننده فضا	بدون بعد
n_P	تعداد فازها	بدون بعد
\hat{C}_K	غلظت جذب شده جزء K ام	بدون بعد
τ	فاکتور پیچ و خم (Tortusity)	L^{-1}
C_{Vs}	ظرفیت گرمایی خاک در حجم ثابت	$ML^2T^{-2}\theta^{-1}$
\tilde{C}_K	درجه اشباع (حجمی) جزء K ام	بدون بعد
$u_{li}^2 u_{lj}$	مولفه های سرعت داری فاز l ام در جهات i و j	LT^{-1}
$\rho_K^2 \rho_S^2 \rho_l$	چگالی نسبی جزء K ام، فاز جامد S و فاز l ام	بدون بعد
ϕ	تخلخل	بدون بعد
ϕ_R	تخلخل در فشار مبنا	بدون بعد
S_l	درجه اشباع (حجمی) فاز l ام	بدون بعد
C_{KI}	غلظت (حجمی) جزء K ام در فاز l ام	بدون بعد
μ_l	ویسکوزیته دینامیکی فاز l ام	$ML^{-1}T^{-1}$
C_K^0, C_t	تراکم پذیری K ام و کل	$M^{-1}LT^2$
C_r	تراکم پذیری خاک	$M^{-1}LT^2$
α_{Li}, α_{Ti}	دیسپرسیویته طولی و عرضی فاز l ام	L
K	هدایت هیدرولیکی	LT^{-1}
r_{KI}, r_{KS}	ثابت واکنش مرتبه اول برای جزء K ام در فاز l ام و در فاز جامد S	T^{-1}
k	نفوذپذیری ذاتی	L^2
Q_K	نرخ تولید یا تزریق جزء K ام بر واحد حجم کلی	T^{-1}
P_l	فشار فاز l ام	$ML^{-1}T^{-2}$
k_{rl}	نفوذپذیری نسبی فاز l ام	بدون بعد
γ_l	وزن مخصوص فاز l ام	$ML^{-2}T^{-2}$
δ_{ij}	تابع کرونگر دلتا	بدون بعد
h	عمق از سطح زمین	L
D_{KI}	ضریب پخشیدگی جزء K ام در فاز l ام	L^2T^{-1}

**بهینه سازی تکنولوژی تخلیه دوپمپه**

در حال حاضر بهینه سازی تکنولوژیهای پاکسازی موجود موضوع تحقیقات بسیاری از دانشمندان است. در تلاشی که اخیراً توسط جونز و همکارانش در دانشگاه تکزاس انجام شده، رابطه تحلیلی برای بیشینه کردن راندمان پاکسازی با استفاده از تکنولوژی تخلیه دوپمپه ارائه شده است. این رابطه خطی که بیانگر نسبتی بین دبی های آب و نفت درون چاه است، تضمین کننده عدم پخش آلودگی بیشتر در خاک است [۳]. رابطه بین دبی پمپ آب و نیز پمپ نفت به صورت زیر ارائه شده است. پارامترهای مورد استفاده در این رابطه در ادامه توضیح داده شده اند.

$$Q_o \geq \frac{\rho_w b_{oi} K_o}{\rho_o b_{wi} K_w} Q_w \quad (15)$$

که در آن پارامترهای ρ_o و ρ_w به ترتیب چگالی نفت و آب بوده و b_{oi} و b_{wi} نیز در شکل شماره ۱ نشان داده شده اند. بقیه پارامترها عبارتند از:

Q_o : دبی پمپ نفت درون چاه

Q_w : دبی پمپ آب درون چاه

K_o : نفوذ پذیری هیدرولیکی نفت در خاک

K_w : نفوذپذیری هیدرولیکی آب در خاک

این رابطه با فرضیات ساده کننده زیر حاصل شده است:

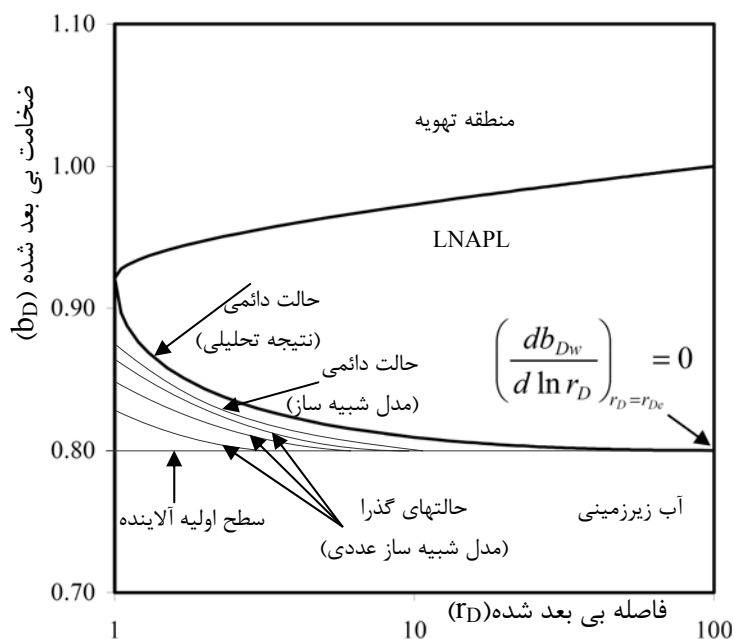
- (۱) این رابطه برای حالت دائمی توسعه داده شده است.
- (۲) سیالات (نفت و آب) تراکم ناپذیر و ویسکوزیته آنها ثابت می باشد.
- (۳) دبی پمپاژ نفت و آب ثابت است.
- (۴) جریان شعاعی به سمت چاه یک بعدی می باشد.
- (۵) سیالات آب و نفت در حالت تعادل عمودی قرار دارند.
- (۶) آبخوان همگن و ضخامت ثابتی دارد.
- (۷) هدایت هیدرولیکی آبخوان به اندازه ای است که می توان از فشار مویبندی صرف نظر کرد.

مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج تحلیلی

در این تحقیق با انجام یک سری شبیه سازی و بررسی منطقی نتایج آن، انتشار آلاینده های نفتی در حین پاکسازی با روش تخلیه دو پمپه مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج حاصل از رابطه تحلیلی که توسط گروه محققین ارائه شده است، مقایسه شده است. شایان ذکر است که این شبیه سازیها با استفاده از مدل UTCHEM روایت ۹/۱ که قبلاً معرفی شد، انجام شده و گسترش و پخش آلودگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با استفاده از مقایسه انجام شده علاوه بر صحت سنجی مدل با مقایسه با رابطه تحلیلی ارائه شده، می توان همخوانی بین جوابهای این دو روش را نیز مورد بررسی قرار داد. در شکل شماره ۲ خطوط هم غلظت در حین پمپاژ که به طور حدی به خطوط هم غلظت حالت دائمی (نتایج تحلیلی) نزدیک می شوند، نشان داده شده است. حرکت کلی خطوط به سمت حالت دائمی بوده و همخوانی کلی بین نتایج مدل شبیه سازی با حل تحلیلی وجود دارد. مقادیر پارامترها در شبیه سازی عددی مشابه با مقادیر استفاده شده در روش تحلیلی و به صورت زیر می باشند:

$$Q_{Dw} = \frac{Q_w}{2\pi K_w b_{ii}^2} = 6.9 \times 10^{-3} \text{ و } Q_{Do} = \frac{Q_o}{2\pi K_o b_{ii}^2} = 2.16 \times 10^{-3}, \rho_o / \rho_w = 0.8$$

$$b_{Dw} = \frac{b_w}{b_{ii}} \text{ و } r_{De} = \frac{R}{r_w} = 100 \text{ و } b_{Doi} = \frac{b_{oi}}{b_{ii}} = 0.2$$



شکل ۲- مقایسه خطوط هم غلظت در مدل شبیه سازی عددی با حالت تحلیلی

مطالعه موردی

پالایشگاه اصفهان در دامنه کوههای سید محمد در فاصله ۲/۵ کیلومتری جاده قدیم اصفهان-تهران در شمال غربی شهر اصفهان واقع شده است. در شکل شماره ۳ موقعیت این پالایشگاه به همراه مکان چاههای مشاهده و همچنین عمق آبهای زیرزمینی نشان داده شده است. به دلیل نشت بنزین به آبهای زیرزمینی منطقه آلودگی LNAPL در چاههای منطقه مشاهده شده که نیاز به پاکسازی دارد. لذا با استفاده از اطلاعات موجود از آبهای زیرزمینی منطقه و فرض کردن مقادیری منطقی برای داده های غیر موجود، سعی شد تا وضعیت پخش آلاینده نفتی در حین پاکسازی به روشهای تک چاهی و نیز دو چاه نزدیک به هم بررسی شود.

این مقادیر عبارتند از:

ρ_o : وزن مخصوص آلاینده نفتی برابر با 0.762 g/cm^3 است.

ρ_w : وزن مخصوص آب برابر با 1 g/cm^3 است.

Q_o : دبی پمپ نفت درون چاه

Q_w : دبی پمپ آب درون چاه

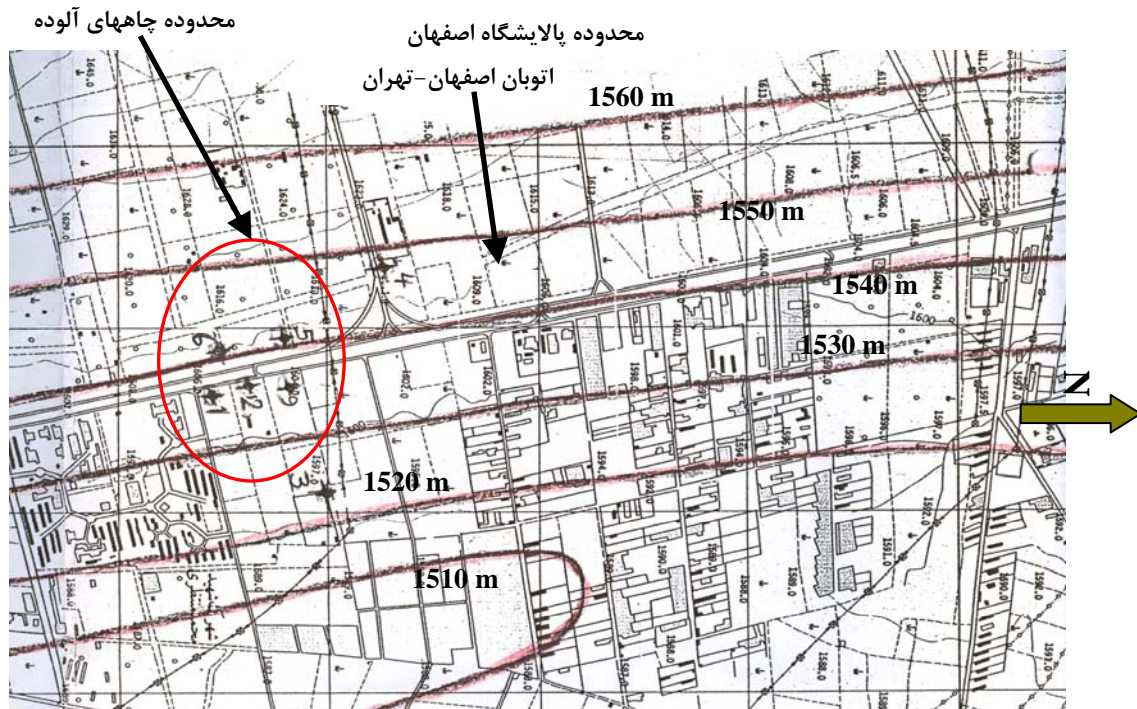
b_{oi} : ضخامت اولیه نفت روی سطح آب است که برابر با 40 cm می باشد.

b_{wi} : ضخامت اولیه لایه آب که برابر با 13 m می باشد.

K_o : نفوذ پذیری هیدرولیکی نفت در خاک برابر با 0.425 cm/s می باشد.

K_w : نفوذپذیری هیدرولیکی آب در خاک برابر با 0.5 cm/s می باشد.

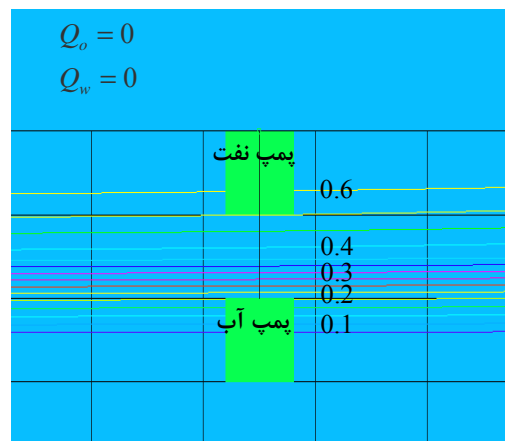
مدل شبیه سازی در حالت‌های مختلف اجرا گردید. شکل‌های ۴ و ۵ شمایی کلی از توزیع خطوط هم غلظت را قبل از شروع پمپاژ برای پاکسازی نشان می دهد. در این حالت همه خطوط هم غلظت به صورت افقی قرار گرفته اند. در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می شود، خطوط هم غلظت در اطراف هر چاه در حین پاکسازی تا حدودی به سمت پایین متمایل شده است که بسته به ابعاد مساله این ناحیه (ناحیه ای که قبلاً آلوده نبوده یا غلظت آلودگی کمتری داشته) می تواند حجم قابل توجهی داشته باشد. در عوض شکل‌های ۸ و ۹ نشان دهنده عدم پخش بیشتر آلودگی در حین پاکسازی هستند. شایان توجه است خطوط هم غلظت در این دو شکل حداکثر در همان مکان قبل از پاکسازی باقی مانده و هرگز خود را به پایین تر از سطح اولیه آلودگی نمی رسانند که این نکته بسیار مهم در موقع پاکسازی محسوب می شود.



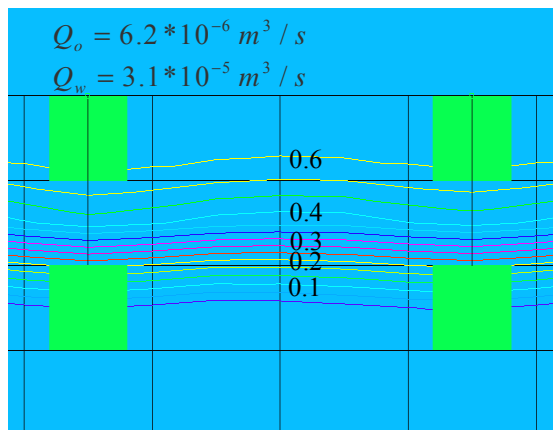
شکل ۳- موقعیت پالایشگاه اصفهان، خطوط هم عمق آبهای زیرزمینی و منطقه آلوده به LNAPL



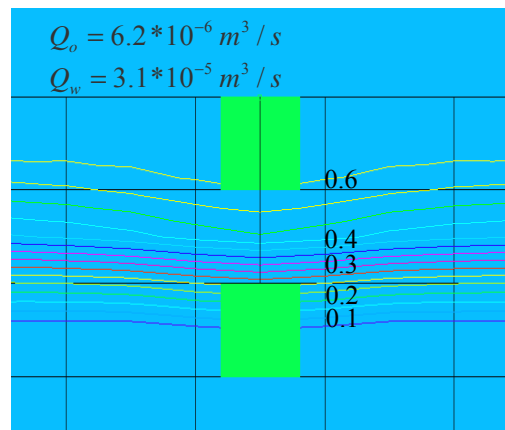
شکل ۵ - توزیع آلودگی در اطراف دو چاه نزدیک به هم



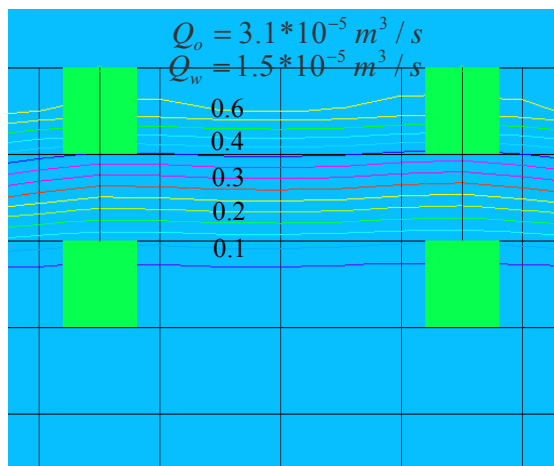
شکل ۴ - توزیع آلودگی در اطراف یک چاه



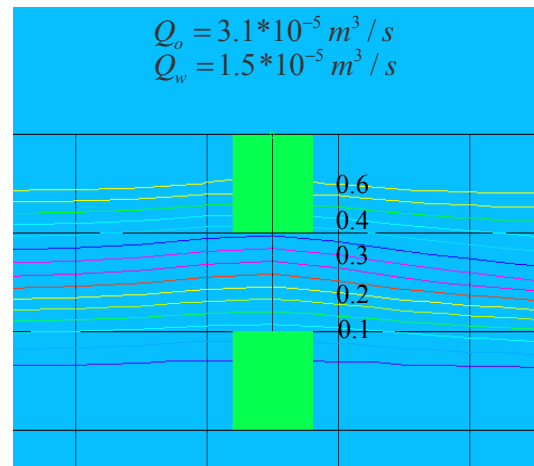
شکل ۷ - پاکسازی بدون رعایت ضوابط و در نتیجه پخش شدن بیشتر آلاینده ها در حالت دو چاهی



شکل ۶ - پاکسازی بدون رعایت ضوابط و در نتیجه پخش شدن بیشتر آلاینده ها در حالت تک چاهی



شکل ۹ - پاکسازی با رعایت ضوابط و در نتیجه عدم پخش شدن بیشتر آلاینده ها در حالت دو چاهی



شکل ۸ - پاکسازی با رعایت ضوابط و در نتیجه عدم پخش شدن بیشتر آلاینده ها در حالت تک چاهی

نتیجه گیری

با عنایت به لزوم پاکسازی آبخوانهای آلوده به مواد نفتی سبک و به ویژه کاربرد روش تخلیه دو پمپه در این فرآیند پاکسازی، در این مقاله مدل شبیه سازی عددی جهت انتخاب نسبت دبی پمپاژ آب به نفت در حالت جریان نادائمی و سیستم چند پمپه ارائه گردید که در مقایسه با روش تحلیلی نتایج قابل قبولی به دست آمده است. با استفاده از این شیوه شبیه سازی دو مزیت استفاده از تکنولوژی تخلیه دو پمپه همچنین عدم پخش آلاینده همزمان حاصل گردیده است. البته این شیوه شبیه سازی مبتنی بر فرضیات ساده کننده ای بیان شده می باشد. نکته مهم دیگری که از اجرای مدل شبیه سازی در حالت های مختلف به دست آمد آنست که در حالت وجود چند چاه با شعاع های تاثیر متداخل، وضعیت پاکسازی از حالت یک چاه رضایت بخش تر است، به این معنی که خطوط هم غلظت آلودگی در حالت چند چاهی خود را به مکان بالاتری نسبت به حالت تک چاهی رسانده و بدین وسیله انتقال آلاینده ها را به ترازهای پایین تر (مکانهایی که قبلا آلوده نبوده است) را غیرمحمول می سازد.

قدردانی

از دفتر امور پژوهشی و پشتیبانی علمی شرکت مدیریت منابع آب ایران به دلیل حمایت مالی از طرح تحقیقاتی به شماره ۸۶۰۰۱-ENVI که این مقاله نیز مستخرجه از این طرح تحقیقاتی می باشد، تشکر و قدردانی می گردد.

مراجع

1. Oostrom, M., Hofstee, C. and Wietsma, T.W. (2006) LNAPLs do not always Float: An example case of a viscous LNAPL under variable water table condition. *Journal of Hydrology Days*.
2. Bhandari, A., Surampalli, R. and Champagne P. (2007) *Remediation Technologies for Soils and Groundwater*. American Society of Civil Engineers.
3. Russell, T., Larry, W. and Abimbola, B. (2004) Analytical solutions for free-hydrocarbon recovery using skimmer and dual-Pump wells. *Groundwater Monitoring and Remediation journal*. (Submitted)
4. Khan, F., Husain, T., and Hejazi, R. (2004) An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, **71**, 95-122
5. Virginia Blacksburg. (2004) *API Interactive LNAPL Guide*, Environmental Systems & Technologies, USA.
6. Newell, J., Acree, S., and Ross, R. (2006) *Light Nonaqueous Phase Liquids*. Groundwater Issue of Environmental Protection Agency, USA.
7. Center for Petroleum and Geosystems Engineering. (2000) *Technical Documentation for UTCHEM-9.0 A Three-Dimensional Chemical Flood Simulator*. The University of Texas at Austin, USA.