مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف
فروردین‌ماه‌ردیبهشت ۱۳۸۷، شماره‌ی چهل و یکم، ص. ۵۹-۶۴ (یادداشت فنی)

مدل‌سازی نحوه‌ی پراکنش آلاینده‌های محلولِ حاصل از نشتی با میزان متغیر در آب‌های زیرزمینی

سارا ترکمنی (دانشجوی دکتری)
جلال شایگان (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

آب یکی از منابع اساسی مورد نیاز بشر است. ممکن است در بعضی مناطق، منابع آب‌های سطحی محدود باشد یا دسترسی به آنها آسان نباشد. در این شرایط می‌توان با حفر چاه، از آب‌های زیرزمینی بهره‌برداری کرد. با توجه به رشد جمعیت کشور و محدودبودن آب‌های سطحی، شاهد برداشت روزافزون از آب‌های زیرزمینی در نقاط مختلف کشور هستیم. نیاز مستمر به آب آشامیدنی و افزایش روزافزون منابع آلاینده، بررسی دقیق میزان آلاینده‌های ورودی به آب‌های زیرزمینی و مدل‌سازی ریاضی چگونگی پخش آنها را ضروری می‌سازد؛ زیرا اتکا به نمونه‌برداری و انجام آزمایشات در این زمینه، زمان‌بر و مستلزم صرف هزینه‌ی زیاد است. از سوی دیگر، با توجه به محدودبودن تعداد نقاط نمونه‌برداری، می‌توان اذعان داشت که مطالعات بر روی مدل‌سازی ریاضی و تبدیل آن به نرم‌افزار، منجر به صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌یی در زمان، نیروی کار و هزینه می‌شود.

در این نوشتار، مدل‌سازی نحوه‌ی پراکنش آلاینده‌های محلول در آب زیرزمینی برای حالتی است که نشر آلاینده از منبع آلودگی به‌مدت ۶ ماه به‌صورت پیوسته و به‌میزان $5000\,ppm$ صورت گرفته و سپس منبع آلودگی قطع شده است. در رابطه‌ی ریاضی مبنای مدل‌سازی، پدیده‌های انتقال آلاینده ــ اعم از نفوذ و انتقال توسط جریان آب زیرزمینی ــ لحاظ شده‌اند و حل معادله به‌صورت عددی و به روش تفاضل محدود انجام شده است.

طبق نتایج مدل، چنانچه نشر آلودگی به‌طور مداوم ادامه یابد بیشینه غلظت آلاینده، در محل ورود آن به آب زیرزمینی و برابر با میزان ورودی آن (یعنی $5000\,ppm$) است، در حالی که اگر پس از ماه ششم منبع آلودگی قطع شود، بیشینه غلظت ۲ ماه بعد از قطع آلاینده، در فاصله‌ی ۵۰متری از محل نشت و برابر با $3200\,ppm$ خواهد بود، و نیز ۷ ماه پس از قطع آلاینده میزان آن در فاصله‌ی ۵۰ متری از محل نشت و معادل $370\,ppm$ تخمین زده می‌شود. لازم به ذکر است که ۷ ماه پس از قطع آلاینده، میزان آلودگی در فاصله‌ی ۵۰۰ متری از محل نشت، حدوداً برابر با $50\,ppm$ خواهد بود.

sara_torkamani@yahoo.com
shayegan@sharif.edu

۱. مقدمه

با فرورفتن آب‌های سطحی به داخل زمین، غالباً یک منطقه‌ی اشباع، که «آبخوان» نامیده می‌شود، در بالای لایه‌ی غیرقابل نفوذی که از سنگ‌های مخزن و آب تشکیل شده، ایجاد می‌شود. حد فاصل بین سطح زمین و آبخوان، همان منطقه‌ی تهویه یا غیراشباع است. آب و آلاینده‌های نفوذی به زمین، ابتدا از منطقه‌ی تهویه می‌گذرند و تا حدی تصفیه می‌شوند. آلاینده‌های رسوب‌کرده به خاک و آب‌های زیرزمینی، تحت تأثیر یک سری فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی قرار می‌گیرند که ممکن است منجر به کاهش غلظت آلاینده یا کاهش آثار مخرب ناشی از آن شود. این فرایندها، که اصطلاحاً «فرایندهای کاهنده‌ی آلاینده‌ها» نامیده می‌شوند، به شرایط هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی ــ اعم از pH، پتانسیل اکسایش ـ کاهش، مساحت سطح تماس آب با سنگ مخزن، و خصوصیات خاک و آبخوان ــ کاملاً وابسته‌اند. فرایندهای فوق بسیار پیچیده‌اند و تعیین میزان دقیق تأثیرات هریک از آنها بر آلاینده‌ها، تنها به‌صورت تخمینی میسر است. فرایندهای کاهنده‌ی آلاینده‌ها عبارت‌اند از: پراکنش، انتقال توسط توده‌ی جریان آب، جذب، تبادل یونی، اکسایش ـ کاهش، تجزیه‌ی زیستی، آب‌کافت (هیدرولیز)، تصفیه‌ی مکانیکی، تبخیر آنی ناشی از فراریت بالا، خنثی‌سازی و خاصیت بافری.

پارامترهای مهم مؤثر بر انتقال آلاینده‌ها عبارت‌اند از: چگالی، حلالیت و گران‌روی (ویسکوزیته‌ی) آلاینده. همچنین عوامل مؤثر بر میزان تأثیر «فرایندهای کاهنده‌ی آلاینده‌ها» عبارت‌اند از: نوع آلاینده، مدت زمان تماس آلاینده با خاک و آبخوان، خواص فیزیکی، شیمیایی و قطر ذرات خاک و منطقه‌ی اشباع و همچنین مسافت طی شده توسط آلاینده. هرقدر مسافتی که آلاینده طی می‌کند و مدت زمان تماس آن بیشتر باشد اثر فرایندهای کاهنده‌ی آلاینده نیز به‌مراتب بیشتر خواهد بود. نحوه‌ی انتقال آلاینده در آب‌های زیرزمینی کاملاً وابسته به چگالی آن است. آلاینده‌های سبک‌تر از آب زیرزمینی (دارای چگالی کم‌تر از آب زیرزمینی) روی سطح آب شناورند، درحالی که آلاینده‌های سنگین‌تر به سمت پایین لایه‌ی آب‌دار

حرکت می‌کنند و در امتداد سنگ بستر منتقل می‌شوند. حلالیت آلاینده‌ها در آب ــ یعنی میزان جرمی از آلاینده که در واحد حجم آب زیرزمینی حل می‌شود ــ متفاوت است، و چنانچه نیروهای بین مولکول‌های آب و آلاینده‌ها بیش از نیروهای بین مولکولی هریک به‌تنهایی باشد انحلال آلاینده رخ می‌دهد و انتقال تک‌فازی خواهد بود. در غیر این صورت مایع یا جامد واردشده در آب، به‌صورت غیر قابل امتزاج باقی می‌ماند و دو فاز خواهیم داشت.[۱] در ادامه، فرایندهای انتقال در مدل ارائه شده برای تعیین نحوه‌ی پراکنش آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی را شرح می‌دهیم.[۲]

۱.۱. انتقال آلاینده از طریق پراکنش

آلاینده‌ها پس از واردشدن به سیستم آب‌های زیرزمینی به‌تدریج پخش می‌شوند و به‌صورت توده، بخشی از جریان را به خود اختصاص می‌دهد. فرایند پراکنش به‌صورت برگشت‌ناپذیر و غیریکنواخت، در دو راستا انجام می‌گیرد:

۱. موازی با جریان آب؛ تفاوت میزان تخلخل در امتداد جریان آب منجر به تغییر سرعت آب و پراکنش آلاینده می‌شود.

۲. در دو جهت عمود بر جریان آب؛ پراکنش آلاینده در این جهت به دنبال تغییر مسیر ذرات آب رخ می‌دهد.

پراکنش متشکل است از دو فرایند نفوذ مولکولی و پراکنش مکانیکی ــ که معمولاً در سرعت‌های بالا در رژیم جریان آرام در محیط متخلخل رخ می‌دهد. سرعت پراکنش و شکل توده‌ی آلاینده به هموژنیتی لایه‌ی آبدار بستگی دارد. ضریب پراکنش تابع سرعت جریان آب زیرزمینی است و هرقدر سرعت آب بیشتر باشد توده‌ی مخروطی‌شکل آلاینده سریع‌تر پخش می‌شود. از آنجا که پراکنش تابعی از مشخصات دانه‌بندی محیط است، تعیین دقیق ضریب پراکنش تنها با انجام آزمایشات امکان‌پذیر است.[۳]

۲.۱. انتقال آلاینده از طریق حرکت توده‌ی آب[۲]

انتقال آلاینده‌ها با سرعت متوسط آب زیرزمینی «حرکت توده‌ی آب» (Advection) نامیده می‌شود. سرعت خطی متوسط تابعی است از هدایت هیدرولیکی سازند آب زیرزمینی، تخلخل سازند و گرادیان هیدرولیکی در امتداد جریان آب زیرزمینی. چنانچه آلاینده وارد فرایندهای رسوب‌دهی، انحلال یا جذب شود، سرعت انتقال آن با سرعت متوسط آب زیرزمینی یکسان نخواهد بود.

مدل‌های حاصل ازکار محققین پیشین در زمینه‌ی مدل‌سازی پراکنش آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی عبارت‌اند از:[۵و۴] Allen Freeze، John Cherry و Ogata.

۳.۱. مدل‌سازی یک‌بعدیِ Advection-Dispersion برای منبع نشر پله‌یی در حالت ناپایا

شرایط این مدل عبارت‌اند از: عدم شرکت آلاینده در واکنش‌های شیمیایی، انتقال آلاینده فقط در امتداد یک بعد، انتشار آلاینده به‌صورت پیوسته و با مقداری ثابت و شرایط ناپایا.

$$D_L \partial^2 C/\partial L^2 - \hat{u}_L \partial C/\partial L = \partial C/\partial t \qquad (۱)$$

که در آن:

C = سرعت متوسط جریان آب زیرزمینی؛

C_0 = غلظت آلاینده در منبع نشر؛

$\hat{u}_L$ = غلظت آلاینده؛

L = جهت نشر آلاینده؛

D_L = ضریب نفوذ هیدرودینامیکی در امتداد L.

تأثیرات شرکت آلاینده در واکنش‌های زیست‌شناختی و شیمیایی، در این معادله در نظر گرفته نشده است. با توجه به شرایط مورد نظر، شرایط مرزی برای حل معادله‌ی ۱ عبارت است از:

$$C(L,0)=0 \; L \geq 0, C(0,t)=C_0 \; t \geq 0, C(\infty,t)=0 \; t \geq 0$$

محققین متعددی[۵]، از جمله Rifai در سال ۱۹۵۶، Ebach و White در سال ۱۹۵۸، Banks و Ogata در سال ۱۹۶۱ درخصوص حل تحلیلی معادله‌ی بالا تلاش کرده‌اند. در نهایت کامل‌ترین حل تحلیلی معادله‌ی مذکور توسط آقای Ogata در سال ۱۹۷۰ در قالب رابطه‌ی ۲ ارائه شد:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2}\left[erf\left(\frac{L-\hat{u}_L}{2\sqrt{D_L t}}\right) + \exp\left(\frac{\hat{u}_L L}{D_L}\right) erfc\left(\frac{L+\hat{u}_L}{2\sqrt{D_L t}}\right)\right] \qquad (۲)$$

که در آن، L فاصله‌ی نقطه‌ی مورد نظر از منبع نقطه‌یی انتشار آلاینده است. رابطه‌ی ۲ در بررسی چگونگی نشر آلاینده در برج‌های آزمایشگاهی کاربرد دارد و در مسائل رخ داده در طبیعت کاربرد چندانی ندارد، زیرا در مدل‌سازی فقط یک بعد را مد نظر قرار داده است.

۴.۱. مدل‌سازی سه‌بعدی در حالت غیر پایا برای منبع نشر ضربه‌یی

آقای Baetsle در سال ۱۹۶۹ مطالعات خود را در زمینه‌ی مدل‌سازی سه‌بعدی در شرایط پایا آغازکرد. در این مدل‌سازی شرایط خاصی مد نظر قرارگرفت: عدم شرکت آلاینده در واکنش‌های شیمیایی؛ انتشار آلاینده به‌صورت ضربه‌یی، غیر پایا و هموژن؛ همسان‌گردی (ایزوتروپیک‌بودن) ساختار آب زیرزمینی از لحاظ زمین‌شناسی. در این مدل انتقال آلاینده در امتداد جریان آب زیرزمینی (x) توسط پدیده‌های نفوذ، و انتقال توسط توده‌ی جریان (با سرعتی برابر با سرعت متوسط آب زیرزمینی) صورت می‌گیرد؛ این در حالی است که انتقال آلاینده در امتداد y و z تنها ازطریق نفوذ انجام می‌گیرد. معادله‌ی ارائه شده توسط Baetsle به شرح زیر است:

$$C(x,y,z,t) = \frac{M}{8(\pi t)^{1.5}\sqrt{D_x D_y D_z}} \exp\left(-\frac{X^2}{4D_x t} - \frac{Y^2}{4D_y t} - \frac{Z^2}{4D_z t}\right) \qquad (۳)$$

که در آن پارامترهای X، Y و Z به‌ترتیب عبارت‌اند از فاصله از مرکز ثقل توده‌ی آلاینده در امتداد x، y و z. پارامتر M بیان‌گر غلظت آلاینده در منبع نشر است. پارامترهای D_x، D_y و D_z به‌ترتیب معادل با ضریب نفوذ نشت در امتداد x، y و z هستند.

نتایج مطالعات آقایان Bear (۱۹۷۲)، Marsily (۱۹۸۶)، Bear & Ver-ruijt (۱۹۸۷)[۵] در زمینه‌ی مدل‌سازی نشر آلاینده در سه بعد، در حالت غیر پایا و وجود منبع نشرضربه‌یی مطابق رابطه‌ی ۴ است:

$$F_i = n[v_i - d_{ij}\partial C/\partial x_j] \qquad (۴)$$

که در آن:

F_i= فلاکس جرمی (M/LT^2)

d_{ij}= تانسور ضریب نفوذ (L^2/T)

C= غلظت آلاینده (M/L^3)

v_i= سرعت انتقال آلاینده (L/T)

از موازنه‌ی جرم روابط ۵ و ۶ به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t}+\frac{\partial F_i}{\partial x_i}=nr \qquad (۵)$$

که در آن r عبارت است از جرم آلاینده در واحد حجم آب زیرزمینی که به آب زیرزمینی وارد شده یا به مصرف رسیده است. رابطه‌ی ۵ را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۶ نوشت:

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t}+\frac{\partial(n\nu_i C)}{\partial x_i}-\frac{\partial}{\partial x_i}[nd_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}]=nr \qquad (۶)$$

جذب سطحی آلاینده و واکنش‌های شیمیایی در روابط فوق لحاظ نشده‌اند. حل معادله‌ی ارائه شده در شرایطی که جریان هموژن است و جهت جریان آب زیرزمینی تغییر نمی‌کند $(v_2=0, v_3=0)$:

$$C(x_1,t)=\frac{M}{An\sqrt{2\pi}R_{11}(t)}\exp\left[-\frac{(x_1-X_1(t))^2}{2R_{11}^2(t)}\right] \qquad (۷)$$

$$\frac{dX_1(t)}{dt}=\nu_1 \qquad (۸)$$

$$\frac{dR_{11}^2(t)}{dt}=2d_{11} \qquad (۹)$$

A= سطح مقطع محیط متخلخل

M= کل جرم ورودی به آب زیرزمینی

۲. مدل‌سازی نحوه‌ی پراکنش آلاینده‌های محلول در آب‌های زیرزمینی

معادله‌ی مورد استفاده $Advection-Dispersion$ نام دارد که بیانگر موازنه‌ی جرم آلاینده در آب زیرزمینی است. موازنه‌ی جرم تابعی است از ضریب پراکنش، سرعت آب زیرزمینی و غلظت آلاینده. این معادله را می‌توان برای فضای سه‌بعدی به دست آورد که در این صورت سه ضریب پراکنش در معادله ظاهر می‌شود.

میزان جرم تولیدی+ جرم خروجی − جرم ورودی = نرخ تجمع جرم

میزان جرم مصرف‌شده −

خروج و ورود جرم به المان به دو روش نفوذ و انتقال، توسط توده‌ی جریان صورت می‌گیرد. تولید یا مصرف آلاینده در طی واکنش‌های شیمیایی یا زیست‌شیمیایی امکان‌پذیر است و سرعت انتقال آلاینده توسط توده‌ی جریان آب زیرزمینی بسته به شرایط ممکن است برابر یا متفاوت از سرعت متوسط جریان آب زیرزمینی باشد. المان فرضی به‌صورت مکعبی در نظر گرفته شده که وجوه آن موازی محورهای مختصات‌اند. تعیین عبارات موازنه‌ی جرم به‌شرح زیر است:

$\hat{u}$ = سرعت متوسط جریان آب‌زیرزمینی = سرعت انتقال آلاینده در سیستم آب‌های زیرزمینی

n = تخلخل

$\hat{u}_x nCdA$ = انتقال توسط توده‌ی جریان در امتداد محور x

$nD_x\partial C/\partial x dA$ = انتقال توسط نفوذ در امتداد محور x

D_x = ضریب پراکنش در امتداد محور x

$dA=dy$ وجهی از المان عمود بر امتداد x $dZ=x$.

F_x = میزان آلاینده‌ی انتقال یافته در امتداد x به ازای واحد سطح مقطع

$$F_x=\hat{u}_x nC-nD_x\partial C/\partial x \qquad (۱۰)$$

علامت منفی در رابطه‌ی ۱۰ بیانگر انتقال آلاینده از نقاط دارای غلظت بالا به نقاط دارای غلظت کم است. به‌همین ترتیب F_y و F_x به دست می‌آیند:

$$F_y=\hat{u}_y nC-nD_y\partial C/\partial y \qquad (۱۱)$$

$$F_z=\hat{u}_z nC-nD_z\partial C/\partial z \qquad (۱۲)$$

کل جرم ورودی $=F_x dZ\,dy+F_y dZ dx+F_z dx\,dy$

کل جرم خروجی $=(F_x+\partial F_x/\partial x\,dx)dz\,dy+$
$(F_y+\partial F_y/\partial y\,dy)dz\,dx+(F_z+\partial F_z/\partial z\,dz)dx\,dy$

تفاوت جرم ورودی و خروجی $=(\partial F_x/\partial x+\partial F_y/\partial y_x+$
$\partial F_z/\partial z)dx\,dy\,dz$

با توجه به ناچیزبودن اثر واکنش‌های زیستی، عبارت مربوط به جرم مصرف شده معادل با صفر است. در شرایط غیرپایا داریم:

نرخ تجمع جرم $=n\,\partial C/\partial t\,dx\,dy\,dz$

حاصل جاگذاری عبارات بالا در رابطه‌ی اصلی عبارت است از:

$$\partial(D_x\partial C/\partial x)/\partial x+\partial(D_y\partial C/\partial y)/\partial y+\partial(D_z\partial C/\partial z)$$
$$/\partial z-[\partial(\hat{u}_x C)/\partial x+\partial(\hat{u}_y C)/\partial_y+\partial(\hat{u}_z C)/\partial z]=$$
$$\partial C/\partial t \qquad (۱۳)$$

رابطه‌ی فوق را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۱۴ نوشت:

$$D_y\partial^2 C/\partial y^2++[D_x\partial^2 C/\partial x^2{}_x\partial C/\partial x+\hat{u}_y\partial C/\partial y+$$
$$\hat{u}_z\partial C/\partial z]=\partial C/\partial t\hat{u}[-D_z\partial^2 C/\partial z^2] \qquad (۱۴)$$

از آنجاکه محیط هموژن، و سرعت جریان آب زیرزمینی نسبتاً پایا است، D_x، D_y و D_z در این سیستم آب زیرزمینی برابرند. بسته به شرایط حاکم، برخی از جمله‌های عبارت بالا معادل صفر درنظر گرفته شده است:

الف) میزان جرم تولیدی معادل با صفر است زیرا منبع تولید آلاینده در المان فرضی موجود در آب زیرزمینی وجود ندارد؛

ب) انتقال آلاینده در راستای عمود بر جهت حرکت آب زیرزمینی (Y)، توسط پدیده‌ی نفوذ صورت می‌پذیرد؛

ج) در راستای حرکت آب زیرزمینی (X)، انتقال آلاینده توسط پدیده‌ی جریان توده انجام می‌شود.

بدین ترتیب معادله‌ی حاکم بر انتقال بنزین در سیستم آب زیرزمینی عبارت است از:

$$D_y\partial^2 C/\partial Y^2-\hat{u}_x\partial C/\partial X=\partial C/\partial t \qquad (۱۵)$$

معادله‌ی ۱۵ به روش تفاضل محدود حل شده است[۶] که نتایج حاصل به‌صورت سه‌بعدی ارائه شده‌اند.

۳. واسنجی مدل

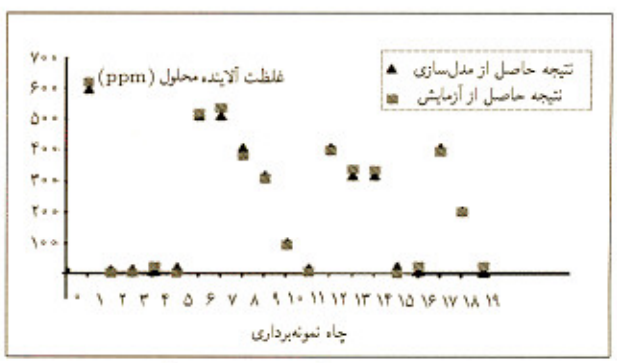
نمونه‌برداری و آنالیز داده‌ها برای واسنجی نتایج حاصل از هرگونه مدل‌سازی ضروری است. منابع عدم قطعیت در مدل‌سازی را می‌توان به عدم قطعیت ناشی از معادله‌ی حاکمه و متغیرها، عدم قطعیت ناشی از پارامترهای مدل و فرایند بهینه‌سازی آنها، عدم قطعیت ناشی از مشاهدات و عدم قطعیت ناشی از داده‌های آزمایشگاهی تقسیم‌بندی کرد. شناسایی و کاهش این منابع عدم قطعیت در مدل‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار است.

واسنجی مدل طبق داده‌های حاصل از نمونه‌برداری از آب‌های زیرزمینی منطقه‌یی از کارولاینا، و آنالیز آنها انجام شده است.[۷] نشر آلاینده‌ها از منبع آلودگی به‌صورت پیوسته رخ داده و آلاینده‌های مزبور محلول در آب بوده‌اند. با توجه به مشخصات نفوذی آلاینده‌ها و مشخصات سفره‌ی آب‌های زیرزمینی منطقه، مدل‌سازی برای تعیین میزان غلظت آلاینده‌ها در نقاط مختلف صورت گرفته است. در شکل ۱ برخی از نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌برداری از آب‌های زیرزمینی (آلوده به مواد محلول) در منطقه‌ی کارولاینا مقایسه شده‌اند.

طبق شکل ۱ می‌توان اذعان داشت که مدل ارائه شده، نتایج قابل قبولی برای تخمین وضعیت آلودگی آب‌های زیرزمینی یک سایت آلوده ارائه می‌دهد؛ زیرا نتایج حاصل از آن به‌خوبی با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت دارد. پس می‌توان با تعیین دقیق شرایط مرزی و شرایط اولیه، مدل‌سازی را برای حالات مختلف انتشار آلاینده انجام داد. به‌عبارت دیگر، این مدل قادر به تخمین چگونگی نشر آلاینده در حالت‌های مختلف است، در حالی که مدل‌های ارائه‌شده‌ی قبلی که حاصل حل تحلیلی معادلات ساده‌شده در شرایط خاص هستند، توانایی‌های بسیار محدودی دارند.

۴. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشر آلاینده‌ی محلول درآب زیرزمینی و تحلیل نتایج

مدل‌سازی نحوه‌ی پراکنش آلاینده‌های محلول در آب زیرزمینی برای حالتی است که در آن نشر آلاینده از منبع آلودگی به‌مدت ۶ ماه به‌صورت پیوسته و به‌میزان $5000\ ppm$ صورت گرفته است و پس از ماه ششم، منبع آلودگی مورد بررسی قرار گرفته و از نشت بیشتر آلودگی جلوگیری شده است. میزان آلاینده‌ی ورودی به آب زیرزمینی در محل نشتی، مطابق نمودار ۱ است که در ۶ ماه اول مقدار آن ثابت



شکل ۱. مقایسه نتایج مدل‌سازی نشرآلاینده محلول در آب زیرزمینی با نتایج آزمایشگاهی.

بوده، ولی با گذشت زمان کاهش یافته است. سرعت متوسط جریان آب زیرزمینی در منطقه‌ی نشت آلودگی، برابر ۱ متر در روز بوده و ضریب نفوذ در امتداد عمود بر جریان آب زیرزمینی حدوداً 10^{-4} مترمربع در ثانیه است. نتایج مدل‌سازی به‌صورت سه‌بعدی ارائه شده‌اند. در شکل ۲ و ۳ و ۴ نحوه‌ی پراکنش آلاینده‌ها پس از گذشت ۸ ماه (درصورتی که نشت آلاینده همچنان با میزان اولیه ادامه داشته باشد) نشان داده شده است. بیشترین غلظت آلاینده، در محل ورود آن به آب زیرزمینی، و برابر با میزان ورودی آن یعنی $5000\ ppm$ است. این در حالی است که با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ و ۷ که حاصل مدل‌سازی برای نشتی طبق نمودار شماره‌ی ۱ است، بیشترین غلظت در فاصله‌ی ۵۰ متری از محل نشتی و برابر با $3200\ ppm$ است.

مزیت مدل ارائه‌شده نسبت به مدل‌های پیشین، قابلیت آن در تعیین وضعیت آلودگی سایت‌های مختلف با شرایط مختلف نشر آلاینده ــ در حالت گذرا یا حالت پایا ــ است. نتایج حاصل از مدل‌سازی پراکنش آلاینده‌ها پس از ۱۰ و ۱۴ ماه به‌ترتیب در شکل‌های ۸، ۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که با گذشت زمان، بیشترین غلظت آلاینده در توده‌ی آلودگی کاهش یافته و فاصله‌ی آن از محل نشتی بیشتر می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به مدل‌سازی انجام شده برای حالت‌های مختلف، نتایج به دست آمده عبارت‌اند از:

۱. فرض‌های ساده‌کننده‌ی مدل‌سازی در دقت نتایج حاصله مؤثرند؛ بدین‌گونه که با افزایش ساده‌سازی شرایط مسئله، می‌توان در مدت زمان کوتاه‌تر و به‌روش‌های ساده‌تر به نتایج حاصله دست یافت، اما دقت ارقام و اعداد به دست آمده کم‌تر است. همچنین تفاوت نتایج مدل‌سازی با نتایج حاصل از نمونه‌برداری و آزمایشگاهی ممکن است به‌دلایل زیر باشد:

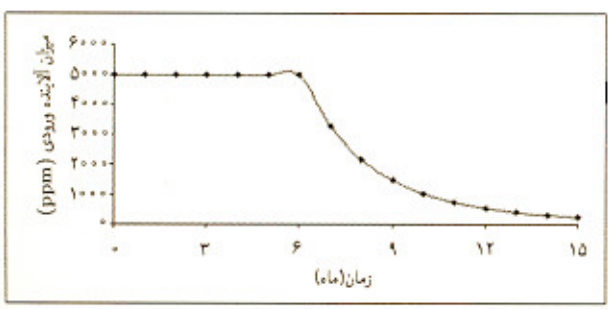
الف) وجود نواحی راکد و ساکن در آبخوان؛

ب) فرایندهای ناشی از تماس محلول ـ جامد؛

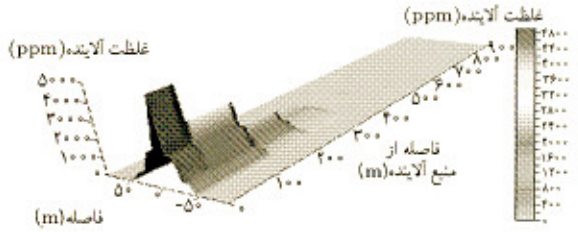
ج) وجود آنیون‌ها؛

د) مبنای کار در مدل‌سازی ارائه شده دو فرض ساده‌کننده‌ی «عدم چسبندگی آلاینده به محیط متخلخل سیستم آب زیرزمینی» و «عدم شرکت آلاینده در واکنش‌های شیمیایی و زیست‌شناختی» بوده است.

۲. مدل ارائه‌شده، نسبت به سایر مدل‌ها، از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است.

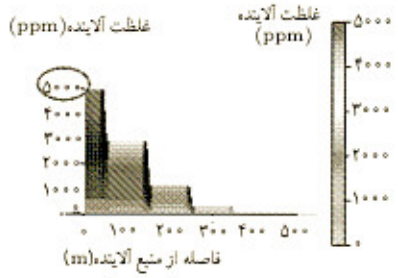


نمودار ۱. چگونگی تغییر میزان آلاینده ورودی به آب زیرزمینی با گذشت زمان.

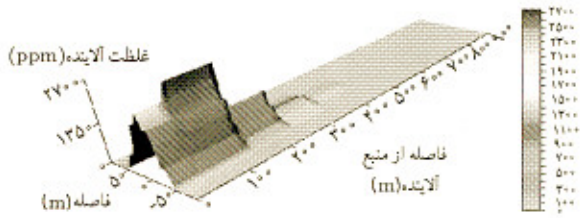


شکل ۲. طرح شماتیک پراکنش آلاینده در آب زیرزمینی پس از گذشت ۸ ماه، درصورتی که میزان آلاینده‌ی ورودی ثابت باشد.

شکل ۳. نمایی شماتیک از بالای توده‌ی آلاینده در آب زیرزمینی، پس از گذشت ۸ ماه، در صورتی که میزان آلاینده‌ی ورودی ثابت باشد.

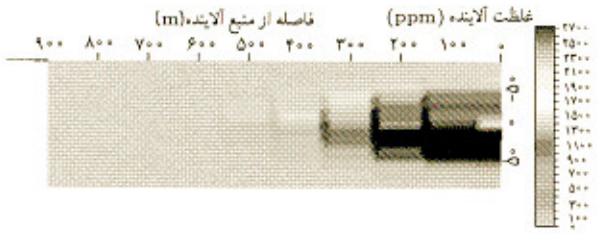


شکل ۴. نما از پهلوی پراکنش آلاینده در آب زیرزمینی، پس از گذشت ۸ ماه در صورتی که میزان آلاینده‌ی ورودی ثابت باشد.

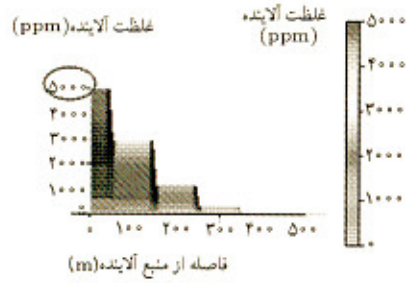


شکل ۵. طرح شماتیک پراکنش آلاینده در آب زیرزمینی پس از گذشت ۸ ماه درصورتی که میزان آلاینده‌ی ورودی متغیر و طبق نمودار ۱ باشد.

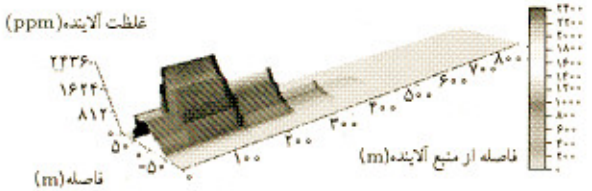
معادله‌یی که مبنای این مدل است، دربرگیرنده‌ی پدیده‌های انتقال آلاینده توسط نفوذ و نیز توسط جریان آب‌های زیرزمینی در جهات مختلف است که با توجه به نحوه‌ی حرکت آب‌های زیرزمینی و پدیده‌های غالب انتقال آلاینده، کاربر می‌تواند عبارات غیرضروری در معادله را حذف کند. از آنجا که حل معادله به‌صورت عددی، و با روش تفاضل محدود انجام می‌شود، کاربر می‌تواند بدون هیچ محدودیتی شرایط مرزی و شرایط اولیه در سایت را مشخص کند که خود بیانگر انعطاف‌پذیری مدل برای تخمین شرایط گوناگون نشر آلودگی است.



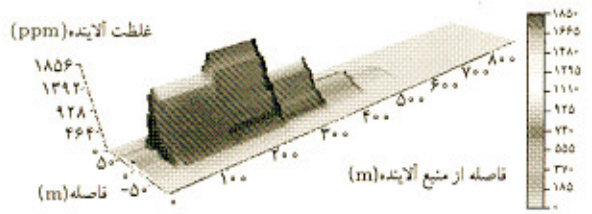
شکل ۶. نمایی شماتیک از بالای توده‌ی آلاینده در آب زیرزمینی، پس از گذشت ۸ ماه، درصورتی که میزان آلاینده‌ی ورودی متغیر و طبق نمودار ۱ باشد.



شکل ۷. نما از پهلوی پراکنش آلاینده در آب زیرزمینی، پس از گذشت ۸ ماه، در صورتی که میزان آلاینده‌ی ورودی متغیر و طبق نمودار ۱ باشد.



شکل ۸. طرح شماتیک پراکنش آلاینده در آب زیرزمینی پس از گذشت ۱۰ ماه، در صورتی که میزان آلاینده‌ی ورودی متغیر و طبق نمودار ۱ باشد.



شکل ۹. طرح شماتیک پراکنش آلاینده در آب زیرزمینی پس از گذشت ۱۴ ماه، درصورتی که میزان آلاینده‌ی ورودی متغیر و طبق نمودار ۱ باشد.

این در حالی است که حل مدل‌های ارائه‌شده‌ی قبلی به‌صورت تحلیلی انجام شده و هریک تنها برای حالات خاص و مشخصی صادق‌اند. پس اصلی‌ترین مزیت مدل ارائه‌شده نسبت به مدل‌های پیشین، قابلیت تعیین وضعیت آلودگی سایت‌های مختلف با شرایط مختلف نشر آلاینده، در حالت گذرا یا در حالت پایا، است.

۳. در صورت کاهش میزان آلاینده‌ی ورودی به آب‌های زیرزمینی که حاصل آگاهی مسئولین و انسداد و رسیدگی به محل نشتی است، محل بیشترین غلظت از

رأس توده به سمت مرکز آن سوق پیدا می‌کند و همچنین غلظت در توده‌ی آلودگی، با گذشت زمان کاهش می‌یابند.

۴. انجام یک سری آزمایشات در تعیین پارامترهای مرتبط با شرایط فیزیکی و شیمیایی بسترهای عبور آلاینده (بسته به نوع خاک و محیط متخلخل در منطقه‌ی مورد نظر) لازم است و از آنجا که این آزمایشات بر دقت نتایج مدل‌سازی مؤثرند، توصیه می‌شود که تمام مراحل آزمایشات با صرف دقت، زمان و هزینه‌های لازم صورت پذیرد.

پانوشت

1. Advection

منابع

1. Aller, Linda. "Drastic: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings", EPA-600/2-87-035, (1987).
2. Dagan, G. and Nguyen, V. "A comparison of travel-time and concentration approaches to modeling transport by groundwater", J. Contam. Hydrol, (1989).
3. Dagan, G. "Flow and transport in porous media", Springer-Verlag, New York, (1989).
4. Freeze, R.A. and Cherry, J.A. "Groundwater", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, (1979).
5. Handbook of Ground water, EPA/625/6-90/016b, Volume I (Groundwater and contamina-tion), (1990).
6. Gerald, Weatley. "Applied numerical analysis", Addision Wesley, Sixth Edition, (2002).
7. Shayegan, J. and Torkamani S. "Contamination dispersion modeling", Master Thesis, (2005).