



فصلنامه علوم محیطی، دوره هجدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹
۵۵-۶۸

ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی توسط آلاینده‌های

صنعتی انبار نفت ساری

محمد رحمانی^{۱*} و طاهره آذری^۲

^۱ گروه علوم محیط زیست، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، مازندران، ایران

^۲ گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۱

رحمانی، م. و ط. آذری. ۱۳۹۹. ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی توسط آلاینده‌های صنعتی انبار نفت ساری. فصلنامه علوم محیطی. ۱۸(۴): ۵۵-۶۸.

سابقه و هدف: محدوده مورد مطالعه، دشت ساری - نکاء می‌باشد که بیشتر مردم آن به فعالیت‌های کشاورزی می‌پردازند. شرکت پخش فرآورده‌های نفتی ساری با تعداد ۱۸ مخزن در جنوب این دشت قرار دارد. با توجه به قدمت این تأسیسات، احتمال نشت ترکیب‌های نفتی وجود دارد. در این تحقیق، امکان نشت و انتقال هیدروکربن‌های محلول در آبخوان ساری بررسی شده است.

مواد و روش‌ها: ابتدا مدل مفهومی دشت براساس داده‌های زمین‌شناسی، جغرافیایی و هیدرولوژیکی ساخته شده و سپس با استفاده از برنامه MODFLOW مدل عددی جریان آب زیرزمینی آبخوان طراحی گشت. در حالت پایدار از نقشه ایزوپتانسیل، مردادماه سال ۱۳۸۳ با کاملترین و دقیقترین داده‌های هیدروژئولوژیکی به‌عنوان سال مدل استفاده شد و براساس آن نقشه توزیع هدایت هیدرولیکی تهیه گردید. در حالت ناپایدار مدل برای ۱۲ ماه بعد از مرداد ۱۳۸۳ کالیبره شد. نتایج میدان سرعت حاصل از مدل جریان آب زیرزمینی به‌عنوان ورودی مدل انتقال آلودگی در نرم افزار MT3DMS استفاده گردید. سپس مدل برای مجموع هیدروکربن نفتی (TPH)^۱ که غلظت آن‌ها در یک بازه زمانی ۱۴ ساله اندازه‌گیری شده بود اجرا گردید. با در نظر گرفتن فرآیندهای همرفت، پراکنش هیدرودینامیکی و جذب در روند پاکسازی طبیعی TPH، مدل انتقال واسنجی و نرخ جذب برآورد گردید. به‌منظور پیش‌بینی پتانسیل پاکسازی طبیعی آبخوان در سال‌های آینده، مدل با نرخ جذب به‌دست آمده، اجرا گردید. در نهایت نمودار تغییرات غلظت TPH تا رسیدن به غلظت استاندارد مجاز نسبت به زمان رسم شد و معادله مربوط به آن تعیین گردید. این معادله می‌تواند ابزار ساده‌ای برای پیش‌بینی تغییرات طبیعی غلظت ترکیب‌های نفتی با زمان در دست کارشناسان باشد.

نتایج و بحث: براساس معادله پاکسازی، مدت زمان لازم برای پاکسازی آلودگی حاصل از نشت آلاینده‌ی نفتی با غلظت اولیه ۱۰ میلی‌گرم در لیتر در آبخوان ساری کمابیش معادل ۶۲ سال تعیین گشت و در صورتیکه در سال‌های آتی هیچ تزریق آلاینده نفتی در آبخوان صورت نگیرد، در سال ۱۴۳۶ هاله آلودگی به‌طور طبیعی توسط آبخوان پاکسازی خواهد شد. براساس پارامترهای واسنجی شده مدل انتقال آلودگی، فاکتور تأخیر در آبخوان ساری معادل ۱/۵۷ محاسبه گردید. همچنین با مدل طراحی شده می‌توان هر سناریو تزریق و تخلیه آلاینده را شبیه‌سازی نمود. به‌منظور پیش‌بینی سرنوشت TPH در سال‌های آتی با شرایط تزریق پیوسته آلاینده نفتی به آبخوان، غلظت TPH اندازه‌گیری شده در اسفند ماه ۱۳۸۸ به‌عنوان غلظت اولیه مدل انتقال آلودگی در نظر گرفته شد. سپس تزریق پیوسته آلاینده نفتی به

* Corresponding Author: Email Address. m.rahmani@umz.ac.ir
<http://doi.org.10.52547/envs.18.4.55>

آبخوان با غلظت ثابت ۱۰ میلی گرم در لیتر در بازه‌های زمانی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ ساله به مدل اعمال شد و در نهایت مدل آلودگی با در نظر گرفتن این شرایط و نرخ جذب به دست آمده در مرحله واسنجی اجرا گردید و انتشار هاله آلودگی در این بازه‌های زمانی با در نظر گرفتن شرایط فرضی ماندگار بودن شرایط هیدرولیکی در آبخوان پیش‌بینی شد. همچنین مدل آلودگی با اعمال سه سناریوی افزایش غلظت تزریق تا ۲۰۰۰۰ میلی گرم در متر مکعب در منبع، کاهش ۳۰ درصدی نرخ پمپاژ چاه‌های اطراف سایت و افزایش ۳۰ درصدی سطح آب رودخانه تجن نیز اجرا گردید. هر کدام از این شرایط سبب ایجاد تغییر در غلظت آلاینده و گسترش هاله آلودگی شد.

نتیجه‌گیری: در صورتیکه در سال‌های آینده به دلیل استهلاک تأسیسات نفتی در سایت انبار نفت ساری، نشت و تزریق پیوسته آلاینده به درون آبخوان صورت بگیرد و پایش و مانیتورینگ مواد هیدروکربنی در محدوده سایت انجام نشود، توسعه هاله آلودگی نفتی در آبخوان مورد مطالعه با گذشت زمان افزایش می‌یابد که در نهایت می‌توان با اجرای پروژه‌هایی نظیر پمپاژ و تصفیه آبخوان، مانع گسترش آن شد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، پاکسازی طبیعی، هاله آلودگی، انبار نفت ساری، مدل انتقال.

مقدمه

غلظت آلاینده‌های نفتی به‌عنوان سنج آلودگی آب‌های زیر زمینی در سال آبی ۸۴ - ۱۳۸۳ و پیش‌بینی حرکت ابر آلودگی، تحت تنش‌های هیدولوژیکی می‌باشد. در این تحقیق کد MODFLOW برای شبیه‌سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی انتخاب شد و از نرم‌افزار GWVISTAS که یک رابط گرافیکی برای این کد و رابطی برای اطلاعات پایگاه GIS به حساب می‌آید استفاده گردیده است. با استفاده از نتایج حاصله از مطالعه مدل جریان (ضرایب هیدرودینامیکی بهینه‌سازی شده و میدان سرعت به دست آمده) مدل انتقال آلاینده این آبخوان با استفاده از نرم افزار MT3DMS تهیه گردید (Zheng and Wang, 1999).

موقعیت منطقه مورد مطالعه

دشت ساری در محدوده‌ای بین غرب شهر ساری تا شرق شهر نکاء واقع شده است. این دشت از شمال به دریای خزر و از جنوب به رشته کوه البرز محدود گردیده است. این دشت جزء حوضه آبریز رودخانه تجن و رودخانه نکاء می‌باشد. مساحت محدوده مورد مطالعه حدود ۶۳۵/۸۵ کیلومتر مربع می‌باشد که بین $53^{\circ} 00'$ تا $30' 53^{\circ}$ طول شرقی و $36^{\circ} 30'$ تا $37^{\circ} 00'$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). آب و هوای معتدل و مرطوب، بارندگی و رطوبت زیاد، درجه حرارت مناسب و پوشش گیاهی زیاد و وجود رودخانه‌های دائمی در منطقه از ویژگی‌های خاص محدوده مورد مطالعه می‌باشد. در آبخوان ساری ده چشمه،

آب زیرزمینی منبع آب شرب بسیاری از مردم ایران بویژه مردم ساکن در منطقه‌های روستایی می‌باشد. در دشت ساری - نکاء آب شرب به‌طور عمده از آب زیرزمینی و از طریق چاه‌های شرب خانگی تأمین می‌گردد. همچنین قسمت عمده‌ای از آب شرب شهر ساری از آب زیرزمینی این دشت تأمین می‌گردد. در قسمت جنوبی محدوده مورد مطالعه شرکت پخش و انتقال فرآورده‌های نفتی وجود دارد که سبب ایجاد آلودگی نفتی آب‌های زیرزمینی محدوده مورد مطالعه گشته است. از آنجایی که تاکنون مدل انتقال آلودگی در محدوده سایت نفتی به‌طور جامع بررسی نشده است، بنابراین به مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی و تهیه مدل‌های جریان و انتقال آبخوان آبرفتی دشت ساری اقدام شده است. مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی در کتاب‌های متعدد به‌خوبی تبیین شده است (Boonstra and Deridder, 1981; Anderson and Woessner, 1992). مدل‌سازی عددی در ایران از سال ۱۳۴۱ با شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی دشت ورامین آغاز شد و پس از آن این روش برای مطالعه آبخوان‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفت. تا سال ۱۳۶۰ حدود ۲۰۰ آبخوان با مساحتی حدود ۵۵۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع در مرحله شناخت و حدود ۸۰ آبخوان با مساحتی در حدود ۲۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع در مرحله نیمه تفصیلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هدف مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی دشت ساری، شناخت تغییرات مکانی و زمانی

نتایج و بحث

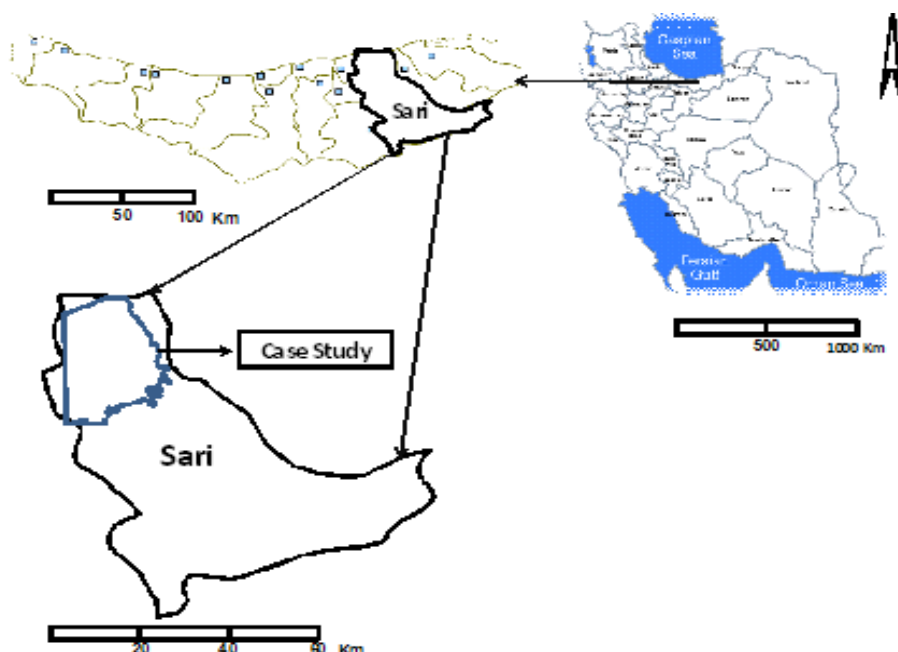
توسعه مدل مفهومی

از بین چاه‌های مشاهده‌ای فعال دشت (۶۴ حلقه)، ۴۸ چاه مشاهده‌ای که در محدوده دشت و در محل مناسبی واقع بودند، به‌عنوان چاه‌های مشاهده‌ای نماینده انتخاب شدند که این چاه‌ها آمار به‌نسبت کاملی داشته و روند تغییرات هیدروگراف سطح آب زیرزمینی در آن‌ها با چاه‌های مشاهده‌ای همجوارشان مطابقت داشت (شکل ۲). برای مدل‌سازی آبخوان آبرفتی ساری - نکاء، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، لاگ‌چاه‌های اکتشافی، نقشه‌ای توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، نتایج مطالعات ژئوفیزیک، اطلاعات سطح آب زیرزمینی ماهانه چاه‌های مشاهده‌ای موجود در دشت، نقشه قابلیت انتقال، تغییرات مکانی و زمانی نرخ تبخیر و تعرق، میزان بارندگی، نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری و تغذیه و تخلیه طبیعی زیرزمینی آبخوان مربوط به سال آبی ۸۴ - ۱۳۸۳ توسط سازمان‌های آب منطقه‌ای و هواشناسی استان مازندران جهت شناخت چارچوب هیدروژئولوژیکی سیستم جمع-آوری شده‌اند.

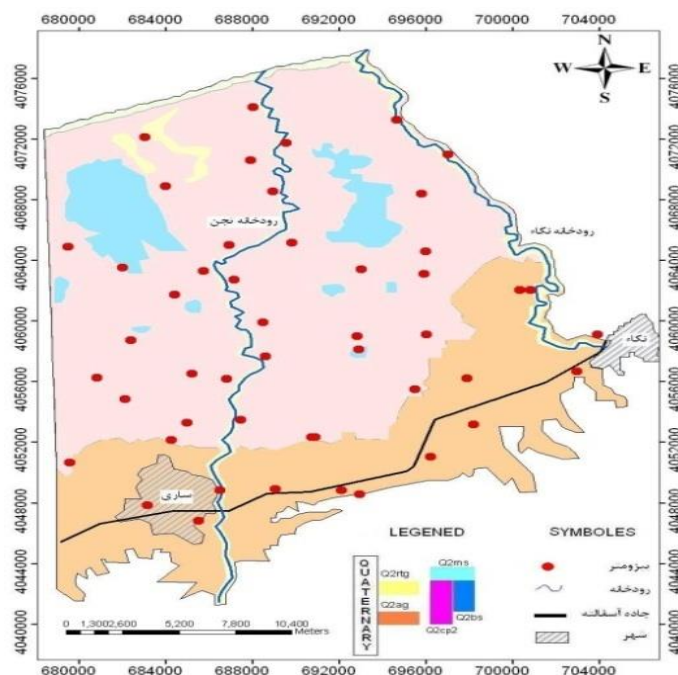
۸ رشته قنات و ۷۵۹۰ حلقه چاه پمپاژ وجود دارد، بنابراین می‌توان عنوان نمود که بیشترین بهره‌برداری از آبخوان ساری از طریق چاه‌های بهره‌برداری صورت می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

اطلاعات لازم برای مدل‌سازی از منبع‌های مختلف تأمین شده است. در محدوده مدل‌سازی، ۴۸ حلقه چاه پیژومتری موجود است. توپوگرافی سطح آبخوان با استفاده از ارتفاع مطلق اندازه‌گیری شده در این پیژومترها تهیه شده است. برای رسم نقشه توپوگرافی سنگ کف از نتایج مطالعات ژئوفیزیک انجام شده، نگاشت‌های اکتشافی و اطلاعات مربوط به چاه-های بهره‌برداری استفاده شده است. آمار موجود سالیانه چاه‌های بهره‌برداری و ماهانه اندازه‌گیری تراز آبی آبخوان در محاسبات بیلان مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات تغذیه به آبخوان با استفاده از آمار بارندگی دشت ساری، آب برگشتی از چاه‌ها و قنات‌ها و آمار هیدرولوژی ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه-های تجن و نکارود به‌دست آمده است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه در کشور
Fig. 1- Position of the study area in the country

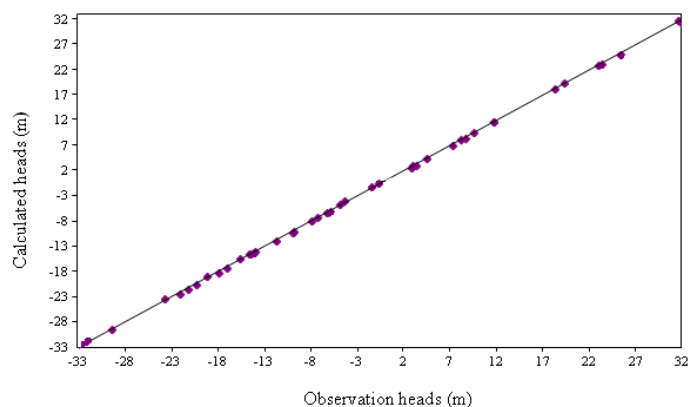


شکل ۲- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای دشت ساری
Fig. 2- Location of the Sari plain's observation wells

هیدرولیکی در پهنه دشت نسبت به کالیبراسیون مدل اقدام و توزیع هدایت هیدرولیکی در پهنه دشت تعیین گردید. در انتهای مرحله کالیبراسیون در حالت پایدار، نتایج حاصل در ۴۸ حلقه چاه مشاهده‌ای نشان داد که تفاوت سطح آب مشاهداتی و محاسباتی اندک می‌باشد. شکل (۳) برازش سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در پایان فرآیند واسنجی در شرایط پایدار را نشان می‌دهد که اختلاف بار آبی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در پیژومترها کمتر از ۰/۰۵ متر می‌باشد. پس از واسنجی مدل در شرایط پایدار، مدل برای ۱۲ ماه از شهریور ۱۳۸۳ تا مرداد ۱۳۸۴ در شرایط ناپایدار، اجرا و واسنجی گردید. پس از پایان فرآیند واسنجی میزان خطا در بیشتر پیژومترها و در ۱۲ دوره تنش کمتر از ۰/۰۳ متر بود. شکل (۴) هیدروگراف اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده که از دقت بالایی برخوردار است را برای ۸ پیژومتر سنجه در دشت نشان می‌دهد. پس از تأیید صحت کارکرد مدل پیشنهادی و قابل قبول بودن نتایج حاصل از آن، از این مدل برای تعیین چگونگی تغییرات قابلیت انتقال و ضریب ذخیره در دشت و تهیه بیلان آبی استفاده گردید (جدول ۱).

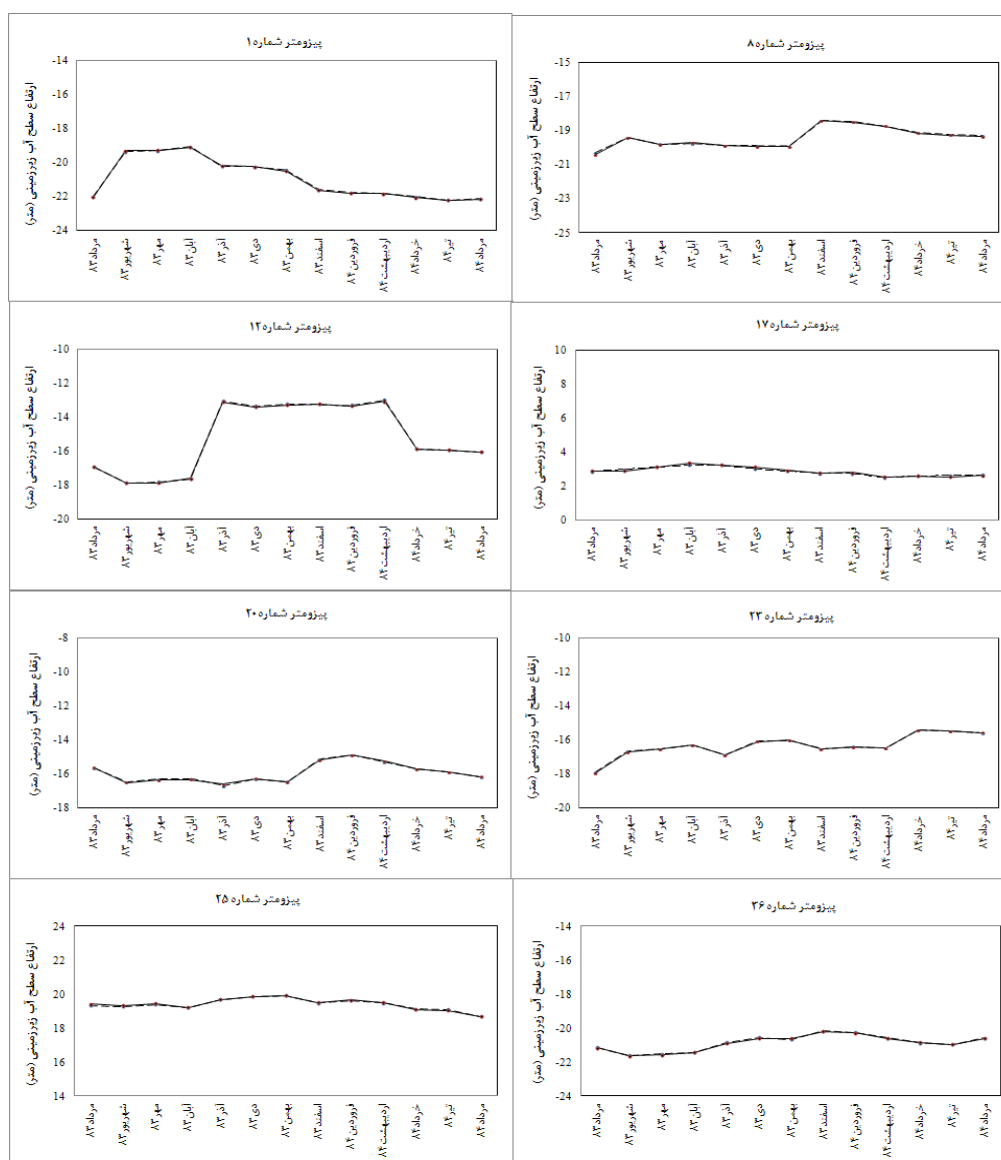
مدل‌سازی جریان در حالت پایدار و ناپایدار

پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز مدل و تعیین محدوده دشت، شبکه تفاضل‌های محدود با ۳۸ ستون و ۵۰ سطر تنظیم گردید. سلول‌های شبکه مدل، مربع شکل با ابعاد ۷۰۰×۷۰۰ متر در نظر گرفته شد. تعیین شرایط مرزی یکی از مشکلترین مرحله‌ها در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی می‌باشد (Anderson and Woessner, 1992; Hill, 1992) که پس از شبکه‌بندی محدوده مدل انجام گرفت. براساس نقشه‌های ایزوپتانسیل در محدوده مورد مطالعه، مرز شمالی و شرقی دشت یعنی دریای مازندران و رودخانه نکارود به‌عنوان مرزهایی با بار آبی ثابت و مرز جنوبی و غربی دشت هم به‌عنوان مرزهایی با بار آبی عمومی در نظر گرفته شد. با بررسی منحنی‌های هم سطح آب زیرزمینی دشت و اختلاف آن‌ها بین سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۸ و تحلیل این نقشه‌ها و نیز رسم هیدروگراف واحد دشت و بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی، مرداد ماه ۱۳۸۳ به‌عنوان ماه تعادل انتخاب شد. تراز سطح آب در این ماه برای مدل به‌عنوان شرایط اولیه تعریف گردید. ابتدا مدل برای شرایط پایدار ماه مرداد ۱۳۸۳ اجرا و با تنظیم هدایت



شکل ۳- برازش مقادیر محاسباتی و مشاهداتی برآبی ۴۸ پیزومتر در حالت پایدار (مرداد ۱۳۸۳)

Fig. 3- Computational and observational hydraulic head of 48 piezometers in the steady state (August 2004)



شکل ۴- هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده (خطوط منقطع) و شبیه‌سازی شده (خطوط پیوسته) پیزومترهای سنجه دشت ساری

Fig. 4- Measured (intersecting) and simulated (continuous lines) hydrographs of index piezometers in Sari plain

جدول ۱-بیلان ماهانه آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی محدوده مورد مطالعه در سال آبی ۸۴ - ۱۳۸۳ (میلیون متر مکعب)

Table 1. Monthly balance of groundwater of the alluvial aquifer in the study area in 2003-2004 (Mm³)

MCM	October	November	December	January	February	March	April	اردیبهشت	خرداد	June	July	August	September	Yearly
تغذیه کشاورزی Agricultural input	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.92	2.12	1.38	2.59	1.19	1.20	10.09	
تغذیه شرب Drinking input	1.47	1.47	1.47	1.41	1.41	1.41	1.59	1.59	1.59	1.56	1.56	1.56	18.07	
تغذیه صنعتی Industrial input	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.09	0.09	0.09	0.42	
رواناب کوهستان Mountain runoff	1.56	4.97	9.67	10.08	2.60	1.77	3.60	2.72	0.72	0.36	0.24	1.41	39.70	
بارش Precipitation	5.87	13.54	22.07	22.49	8.12	6.30	10.51	8.61	3.64	2.55	2.10	5.49	111.28	
ورودی زیرزمینی Underground input	7.10	7.28	7.47	5.403	6.22	6.54	7.00	7.57	7.65	7.90	7.95	8.03	86.113	
ورودی رود River input	0.00	0.64	0.00	1.85	7.58	9.74	3.24	12.36	21.75	23.03	18.28	4.57	103.03	
تخلیه کشاورزی Agricultural output	0.44	0.46	0.49	0.50	0.51	0.57	3.66	8.27	5.56	10.37	4.74	4.78	40.36	
تخلیه شرب Drinking output	0.98	0.98	0.98	0.94	0.94	0.94	1.06	1.06	1.06	1.04	1.04	1.04	12.05	
تخلیه صنعتی Industrial output	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.09	0.09	0.09	0.42	
تبخیر Evaporation	1.57	0.83	0.70	1.21	1.46	1.95	3.24	2.42	2.65	2.47	2.93	1.61	23.02	
خروجی زیرزمینی Underground output	5.077	5.18	5.29	5.21	5.24	5.30	5.80	6.24	6.33	6.25	6.30	6.33	68.547	
زهکشی رود River drainage	3.99	4.42	22.25	49.70	55.34	52.64	34.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	222.50	
ورودی - خروجی Input-Output	4.05	16.13	11.08	-16.217	-37.44	-35.51	-21.07	16.99	21.13	17.85	16.30	8.50	1.806	

طراحی مدل انتقال

نفت سفید، نفت گاز، بنزین سوپر و بنزین A.T.K را در

سطح استان انجام می‌دهد.

براساس گزارش‌های سازمان حفاظت محیط زیست

مازندران، در اسفندماه سال ۱۳۷۴ به دلیل استهلاک و

شکستگی کف یکی از مخازن موجود در محدوده سایت،

حجم بالایی از ترکیب‌های هیدروکربنی در زمین نفوذ کرده

و منجر به آلودگی شدید آبخوان تا فاصله ۱۰ کیلومتری از

محدوده سایت شرکت نفت ساری گردید. براساس

آنالیزهای انجام شده توسط آزمایشگاه هیدروشیمی سازمان

محیط زیست، حداکثر غلظت مجموع هیدروکربن

نفتی TPH، mg/lit، ۱۰ گزارش شد که مربوط به نمونه تهیه

منبع آلودگی در منطقه مورد مطالعه، شرکت ملی

پخش فرآورده‌های نفتی ساری بوده که در شهریور ماه

۱۳۶۶ تأسیس شد و از آن تاریخ وظیفه سنگین تأمین

سوخت مورد نیاز استان مازندران را در ابعاد گسترده‌ای

به عهده دارد. انبار نفت ساری یکی از بزرگترین انبارهای

تدارکاتی شمال کشور است که تعداد ۱۸ مخزن در آن

وجود دارد که وظیفه نگهداری ۵ نوع فرآورده را در سطح

منطقه ساری به عهده دارند. ظرفیت کلی مخازن انبار نفت

ساری ۲۴۵ میلیون لیتر می‌باشد. این انبار با ظرفیت

بارگیری ۷/۵ میلیون لیتر در روز عملیات انتقال بنزین،

زیرزمینی محدوده مورد مطالعه ابتدا نقاط نمونه برداری طی یک مرحله بازدید صحرایی در آبان ماه ۱۳۸۸ انتخاب شدند. نمونه برداری از پنج منبع آبی در اسفندماه سال آبی ۸۹ - ۱۳۸۸ صورت گرفت. متأسفانه به دلیل هزینه بالای آنالیز نمونه‌ها و مناسب نبودن دیگر چاه‌ها برای نمونه برداری به این پنج نمونه بسنده گردید. ویژگی‌های چاه‌های نمونه برداری و نتایج آنالیز نمونه‌ها در جدول (۲) آمده است.

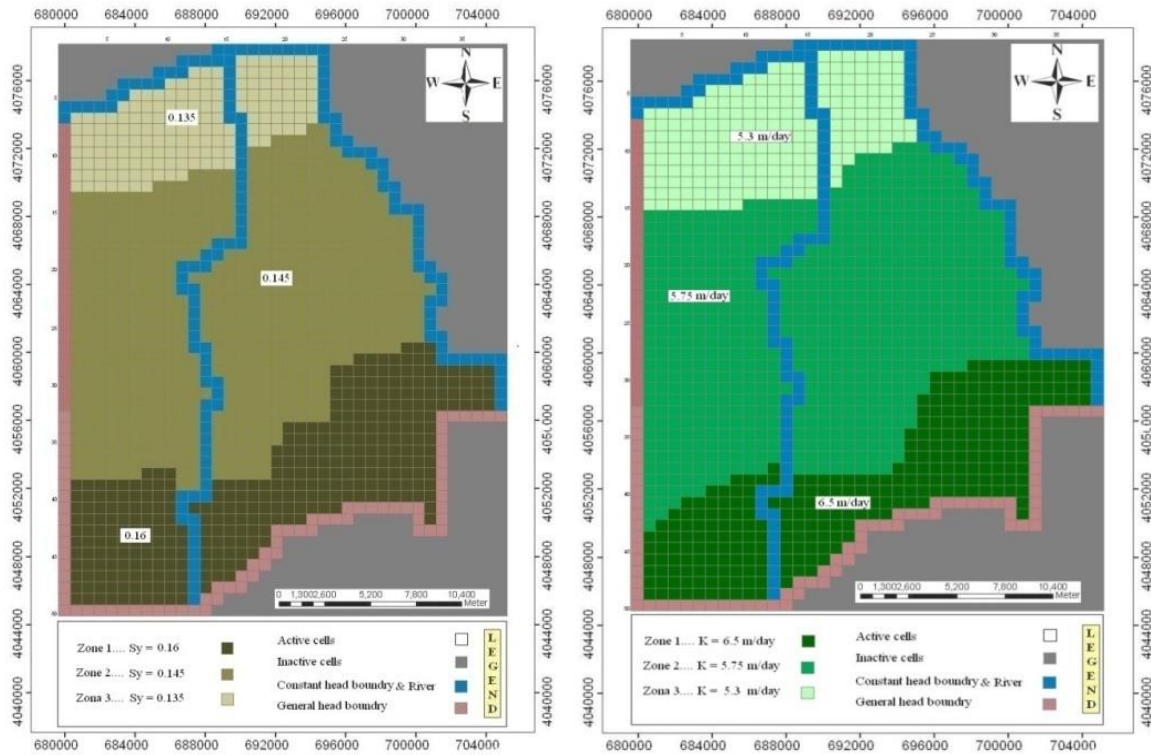
شده از نزدیکترین پیژومتر به مخزن نشستی بود. براساس گزارش‌های آزمایشگاه هیدروشمی شرکت نفت ساری، غلظت TPH در محدوده سایت از سال ۱۳۷۴ تا سال ۱۳۸۸ به صورت ماهانه اندازه‌گیری گردید که نتایج حاصل از آزمایش‌ها روند نزولی در غلظت TPH را در طول زمان نشان داده است به طوری که در بهمن ماه سال ۱۳۸۸ غلظت TPH در نزدیکترین پیژومتر به مخزن نشستی به مقدار ۰/۴۲ mg/lit رسیده است. جهت بررسی آلودگی نفتی آب

جدول ۲- ویژگی‌های نقاط نمونه برداری در اسفندماه ۱۳۸۸ و نتایج آنالیز نمونه‌ها
Table 2. Specifications of sampling points in March 2009 and results of samples analysis

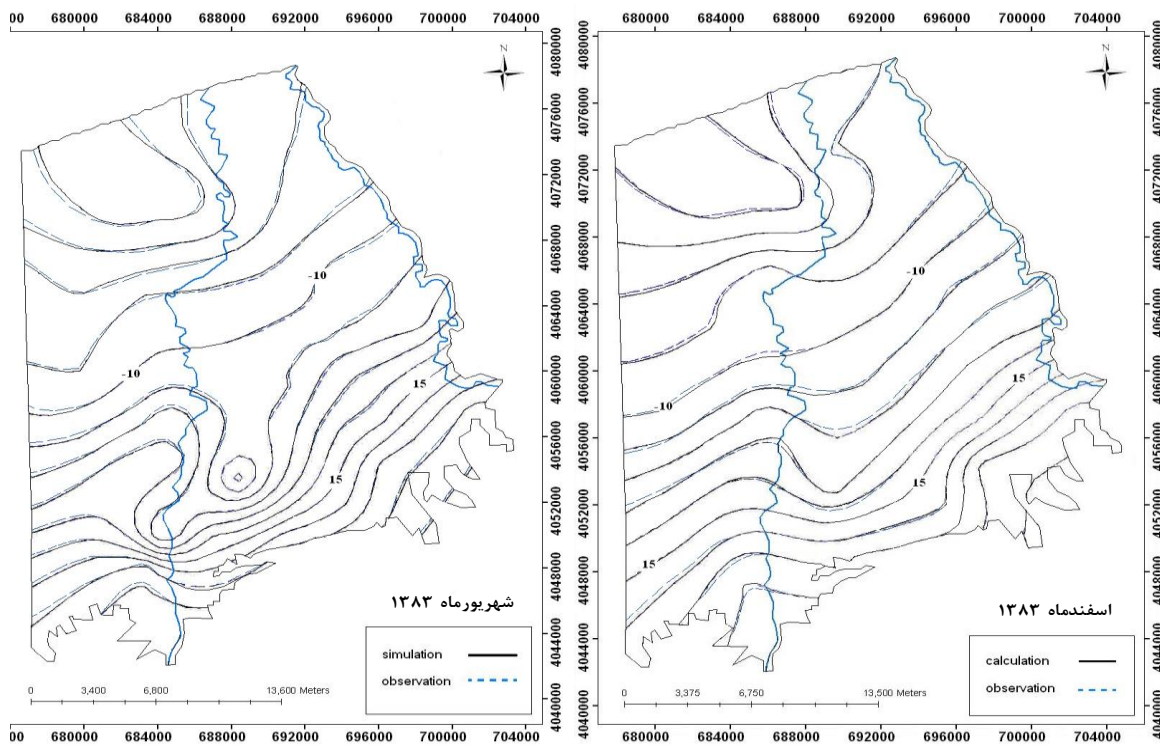
نقاط نمونه برداری Sampling points	نام محل نمونه برداری Name of sampling location	UTMX	UTMY	EC	pH	TPH (mg/L)	T (°C)	تیپ آب Water type
BH-1	روستای آب نو سر Ab Now Sar Village	688235	4046678	812	8.61	<0.2	24	بی کربنات کلسیم Calcium bicarbonate
BH-2	روستای آب نو سر Ab Now Sar Village	688709	4047244	900	8.67	<0.2	24.1	بی کربنات کلسیم Calcium bicarbonate
BH-3	روستای آب نو سر Ab Now Sar Village	688806	4047774	946	8.71	<0.36	23.7	بی کربنات کلسیم Calcium bicarbonate
BH-4	روستای ذغالچال ZoghalChal Village	689049	4049074	990	8.65	0.23	23.8	بی کربنات کلسیم Calcium bicarbonate
BH-5	سایت شرکت نفت Oil Company Site	688950	4048025	944	8.61	0.4	23.8	بی کربنات کلسیم Calcium bicarbonate

که در این مطالعه، روش HMOC^۳ مورد استفاده قرار گرفته است. افزون بر پدیده فرارفت، پدیده پراکنش^۴ نیز بر انتقال آلاینده‌ها مؤثر می‌باشد. بنابراین به منظور شبیه‌سازی ترم پراکنش در حرکت آلاینده‌ها، ضریب پراکنش از طریق روابط تجربی و با استفاده از دانه بندی مقادیر هدایت هیدرولیکی برآورد شده توسط مدل جریان تعیین گردید. به منظور بررسی واکنش‌های شیمیایی در منطقه از بسته واکنش‌های شیمیایی استفاده شده است (Schackelford *et al.*, 1989; Zheng and Bennet., 2002; Okoh and Trejo-(Hernandez., 2006).

از آنجایی که هدف این پروژه بررسی توسعه ابر آلودگی نفتی در آبخوان بوده بنابراین تنها، TPH نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. با استفاده از نتایج حاصل از مدل جریان آب زیرزمینی آبخوان از جمله توزیع هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدی و ویژه (شکل ۵) و نقشه ایزوپتانسیل سطح آب زیرزمینی (شکل ۶) و به کمک نرم افزار MT3DMS، انتقال آلاینده و نحوه‌ی گسترش هاله آلودگی حاصل از آلاینده نفتی شبیه‌سازی شده است (Zheng and Wang, 1999). بسته‌ی نرم افزاری MT3DMS با نگرش تلفیقی Eulerian-Lagrangian حرکت ذره محلول در آب را شبیه‌سازی می‌نماید. پدیده فرارفت^۲ در این بسته-های نرم افزاری با روش‌های مختلف شبیه‌سازی می‌شود



شکل ۵- نقشه توزیع مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه واسنجی شده مدل جریان آب زیرزمینی دشت ساری
 Fig. 5- Calibrated hydraulic conductivity and specific yield map of the Sari plain



شکل ۶- نقشه هم‌میزان بار هیدرولیکی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای مدل جریان دشت ساری شهریور و اسفندماه ۱۳۸۲
 Fig. 6- Observational and calculated hydraulic head maps of the Sari plain in September and March 2004

2000; Zheng and Bannet, 2002; Lenhard *et al.*, 2004; Karan *et al.*, 2011).

اجرای مدل MT3DMS

براساس اطلاعات حاصل از گزارش‌های سازمان حفاظت محیط زیست استان مازندران، غلظت اولیه آلاینده تزریق شده معادل (10000 mg/m^3) در اسفندماه ۱۳۷۴ در نظر گرفته شد. مدل آلودگی برای TPH اجرا شد و ابر آلودگی در اول اسفند ۱۳۸۸ شبیه‌سازی گردید. مقادیر پارامترهای ضریب پراکنش، انتشار و جذب TPH در جدول (۳) نشان داده شده است.

با توجه به وجود مقدار زیاد رس و کربن آلی در خاک و استعداد جذب آلاینده‌های نفتی توسط مواد رسی و کربن آلی، در این تحقیق فرآیند جذب^۵ به‌عنوان سومین فرآیند انتقال و توزیع هیدروکربن‌ها در مدل MT3DMS فعال و فاکتور تأخیر^۶ به‌عنوان پارامتر واسنجی در نظر گرفته شد (Jalbert *et al.*, 2000; Haussard *et al.*, 2003; Ibrahim *et al.*, 2010; Jain *et al.*, 2011). تأخیر با استفاده از روش جذب خطی و چگالی محیط متخلخل قابل اندازه‌گیری است (Kukreti and Rajapaksa, 1989; Kun *et al.*, 1998; Fetter, 2000; Liao and Aral,

جدول ۳- پارامترهای ورودی و واسنجی شده مدل آلودگی
Table 3. Input and calibration parameters of the pollution model

واحد Unit	ارزش پارامتر Parameter's value	نام پارامتر Parameter's name	بسته Package
-	0.4	تخلخل Porosity	تخلخل Porosity
میلی گرم بر متر مکعب mg/m^3	0	غلظت اولیه Initial concentration	غلظت اولیه Initial concentration
-	0.1	پراکنش افقی Horizontal dispersivity	پراکنش افقی Horizontal dispersivity
-	0.01	پراکنش عرضی Transverse dispersivity	پراکنش عرضی Transverse dispersivity
متر مربع بر روز m^2/day	1.72×10^{-5}	مولکولی موثر Effective molecular ضریب انتشار Diffusion coefficient	مولکولی موثر Effective molecular ضریب انتشار Diffusion coefficient
گرم بر سانتیمتر مکعب g/cm^3	1.6	چگالی حجمی Bulk density	واکنش شیمیایی Chemical reaction
سانتیمتر مکعب بر میلی گرم cm^3/mg	0.00014	ضریب توزیع Distribution coefficient	ضریب توزیع Distribution coefficient
میلی گرم بر متر مکعب mg/m^3	10000	غلظت منبع Source concentration	منبع Sink / Source

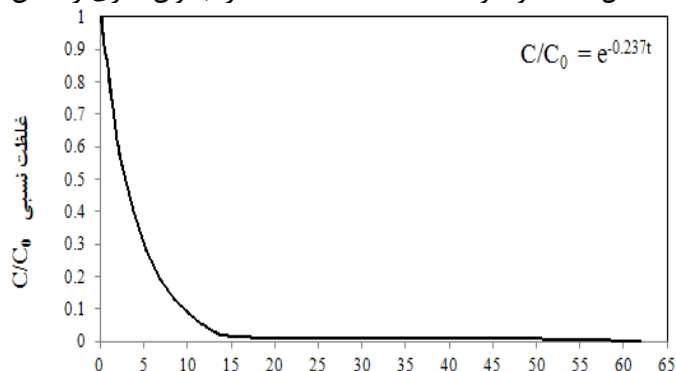
که سرعت خودپالایی آبخوان برای TPH به‌صورت تابع نمایی، نزولی است و مدت زمان لازم برای پاکسازی آلودگی حاصل از نشت آلاینده‌ی نفتی با غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم در لیتر در آبخوان ساری کمابیش معادل ۶۲ سال می‌باشد به‌عبارت دیگر در صورتیکه در سال‌های آینده هیچ تزریق آلاینده نفتی در آبخوان صورت نگیرد، در سال ۱۴۳۶ هاله آلودگی به‌طور طبیعی توسط آبخوان پاکسازی خواهد شد. براساس پارامترهای واسنجی شده مدل انتقال آلودگی (جدول ۳) و با استفاده از

پیش‌بینی

به‌منظور پیش‌بینی سرنوشت TPH در سال‌های آینده و تعیین پتانسیل خود پالایی آبخوان، مدل آلودگی واسنجی شده در سال‌های مختلف اجرا شد و در نهایت نمودار تغییرات غلظت نسبی TPH نسبت به زمان تا رسیدن به غلظت مجاز و معادله پاکسازی طبیعی TPH توسط آبخوان در شکل (۷) نشان داده شده است. در معادله پاکسازی C غلظت در زمان t، C_0 غلظت اولیه و t زمان پاکسازی می‌باشد. شکل (۷) بیانگر این موضوع است

آلودگی نفتی در بازه‌های زمانی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ ساله در آبخوان ساری را نشان می‌دهد.

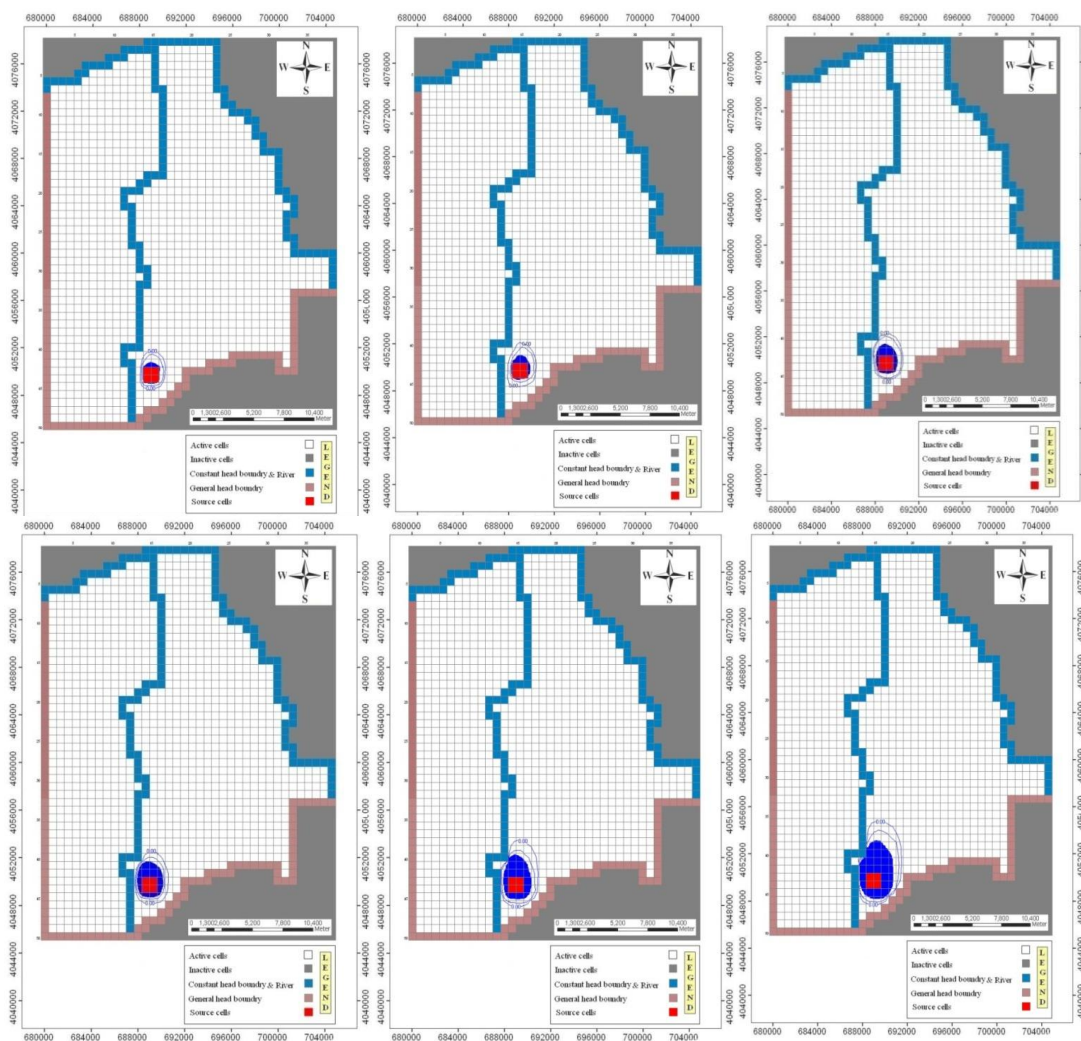
فرمول $R_a = 1 + (\rho_b K_d / n)$ فاکتور تأخیر در آبخوان ساری معادل ۱/۵۷ محاسبه گردید. شکل (۸) نحوه توسعه هاله



زمان پاکسازی (سال)

شکل ۷- تغییرات غلظت نسبی کل هیدروکربن نفتی نسبت به زمان

Fig. 7- Changes in the relative concentration of the total petroleum hydrocarbon (TPH) versus time

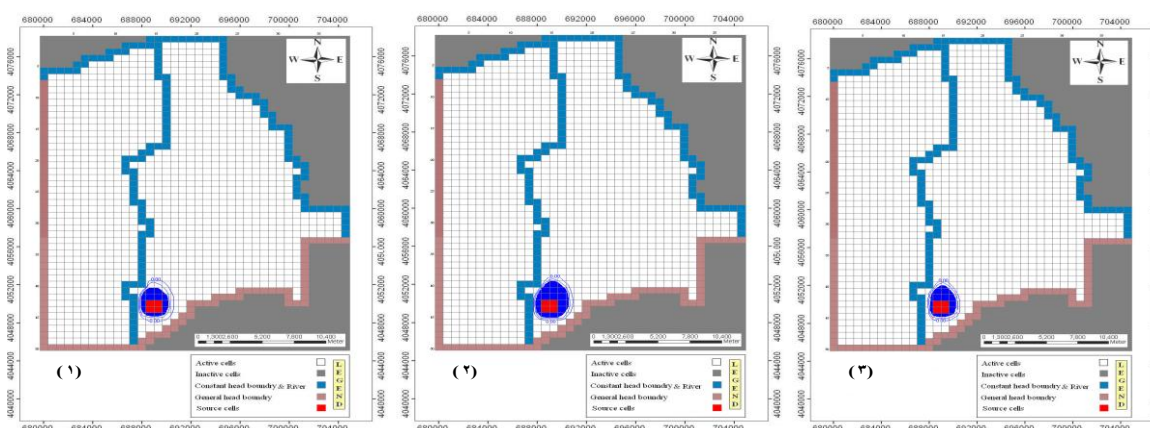


شکل ۸- هاله آلودگی در اسفند ۱۳۸۸ و توسعه هاله آلودگی در بازه‌های زمانی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ ساله

Fig. 8- Pollution plume in March 2009 within 10, 20, 30, 40 and 60 years

تعداد و دبی چاه‌های استحصال و سطح رودخانه روی گسترش هاله آلودگی، مدل آلودگی با اعمال سه سناریوی افزایش غلظت تزریق تا ۲۰۰۰۰ میلی گرم در متر مکعب در منبع، کاهش ۳۰ درصدی نرخ پمپاژ چاه‌های اطراف سایت و افزایش ۳۰ درصدی سطح آب رودخانه تاجن نیز اجرا گردید (شکل ۹). چنانکه ملاحظه می‌گردد هر کدام از این شرایط سبب ایجاد تغییر در غلظت آلاینده و گسترش هاله آلودگی شد.

همچنین با مدل طراحی شده می‌توان هر سناریو تزریق و تخلیه آلاینده را شبیه‌سازی نمود. از آنجایی که اندازه و شکل هاله آلودگی به عواملی همچون زمین شناسی منطقه، سرعت جریان آب زیرزمینی، نوع و غلظت آلاینده، تزریق آلاینده (پیوسته یا منقطع) به آب زیرزمینی و فعالیت‌های انسانی همچون استحصال آب از چاه‌های پمپاژ در منطقه بستگی دارد (Todd, 2005)، جهت بررسی تأثیر غلظت آلاینده در منبع،



شکل ۹- گسترش هاله آلودگی بعد از مدت ۳۰ سال با افزایش غلظت تزریق آلاینده (۱)، کاهش ۳۰٪ پمپاژ از چاه‌های استحصال (۲) و افزایش ۳۰٪ سطح آب رودخانه تاجن (۳)

Fig. 9- Expansion of the pollution plume after 30 years by increasing the concentration of pollutant injection (1), 30% reducing in pumping of wells (2) and 30% increasing in the Tajan River water level (3)

نتیجه‌گیری

پاکسازی خواهد شد و این معادله پاکسازی طبیعی TPH می‌تواند ابزار ساده‌ای برای پیش بینی تغییرات طبیعی غلظت آلاینده‌های نفتی با زمان در دست کارشناسان باشد. در نهایت با توجه به روند فعلی توسعه آلودگی در آبخوان ساری و استهلاک تأسیسات نفتی در سایت انبار نفت ساری، توسعه هاله آلودگی نفتی در آبخوان مورد مطالعه با گذشت زمان افزایش می‌یابد که می‌توان با اجرای پروژه‌هایی نظیر پمپاژ و تصفیه مانع گسترش آن شد.

پی‌نوشت‌ها

- ¹ Total Petroleum Hydrocarbon
- ² Advection
- ³ Hybrid Method of Characteristics
- ⁴ Dispersion
- ⁵ Adsorption
- ⁶ Retardation factor

در این تحقیق، پتانسیل انتقال و پاکسازی طبیعی آلاینده‌های نفتی در سفره آب زیرزمینی دشت ساری به‌منظور بررسی آسیب‌پذیری و مدیریت آبخوان شبیه‌سازی گردید. اجرای مدل انتقال آلودگی نشان داد که منابع آب زیرزمینی محدوده اطراف سایت انبار نفت ساری آلوده می‌باشد که وضعیت فعلی هاله‌ی آلودگی و معادله پیشنهادی برای پاکسازی آلاینده‌های نفتی نشان می‌دهد مدت زمان لازم برای پاکسازی آلودگی حاصل از نشت آلاینده‌ی نفتی با غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم در لیتر در آبخوان ساری کمابیش معادل ۶۲ سال می‌باشد به‌عبارت دیگر در صورتیکه در سال‌های آینده هیچ تزریق آلاینده نفتی در آبخوان صورت نگیرد در سال ۱۴۳۶ هاله آلودگی موجود به‌طور طبیعی توسط آبخوان

منابع

- Anderson, M.P. and Woessner, W., 1992. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Predication Transport*, San Diego: Academic Press, Inc., USA.
- Boonstra, J. and Deridder, N.A., 1981. *Numerical modeling of Ground Water basins user oriented manual*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Netherlands.
- Fetter, C.W., 2000. *Contaminant Hydrogeology*. Second ed. Waveland Press, Inc., USA.
- Frind, E.O., Malson, J.M. and Schimer, M., 1999. Dissolution and mass transfer of multiple organics under field conditions: the borden emplaced source. *Water Resource Research*. 8(35), 683-694.
- Haussard, M., Gaballah, I., Kanari, N., De Donato, P., Barres, O. and Villieras, F., 2003. Separation of hydrocarbons and lipid from water using treated bark. *Water Research*. 37(2), 362-374.
- Hill, M.C., 1992. *MODFLOWP.U.S.G.S. Water Resources Division*. Denver, Colorado, USA.
- Ibrahim, S., Wang, S. and Ang, H.M., 2010. Removal of emulsified oil from oily wastewater using agricultural waste barley straw. *Biochemical Engineering Journal*. 49(1), 78-83.
- Jain, P.K., Gupta, V.K., Gaur, R.K., Lowry, M., Jaroli, D.P. and Chauhan, U.K., 2011. Bioremediation of petroleum oil contaminated soil and water. *Research Journal of Environmental Toxicology*. 5(1), 1-26.
- Jalbert, M., Dane, J.H., Abriola, L.M. and Pennell, K.D., 2000. A nondimensional evaluation of tracer sensitivity to density effects. *Ground Water*. 38(2), 226-233.
- Karan, C.P., Rengasamy, R.S. and Das, D., 2011. Oil spill cleanup by structured fibre assembly. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. 36(2), 190-200.
- Kukreti, A.R. and Rajapaksa, Y., 1989. A numerical model for simulating two-phase flow through porous media. *Applied Mathematical Modelling*. 13, 268-281.
- Kun, Z., Hui, C., Guanghe, L. and Zhaochang, L., 1998. In situ remediation of petroleum compounds in groundwater aquifer with chlorine dioxide. *Water Research*. 32(5), 1471-1480.
- 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*. 73(1), 283-304.
- Liao, B. and Aral, M.M., 2000. Semi-analytical solution of two-dimensional sharp interface LNAPL transport models. *Journal of Contaminant Hydrology*. 44, 203-221.
- Okoh, A.I. and Trejo-Hernandez, M.R., 2006. Remediation of petroleum hydrocarbon polluted systems: exploiting the bioremediation strategies. *African Journal of Biotechnology*. 5(25), 2520-2525.
- Ratchagar, N.P. and Hemalatha, S., 2016. Mathematical model to study the spread of spilled oil in the soil. *Applications and Applied Mathematics-an International Journal*. 11, 351-363.
- Schackelford, C.D., Daniel, D.E. and Liljestrand, H.M., 1989. Diffusion of inorganic chemical species in compacted clay soil. *Contaminant Hydrology*. 3(4), 241-273.
- Todd, D.K. and Mays Larry, W., 2005. *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Yudono, B., Said, M., Sabaruddin, K., Napoleon, A. and Budi Utami, M., 2010. Kinetics of petroleum contaminated by an indigenous bacteria *Bacillus megaterium*. *Hayati Journal of Biosciences*. 17(4), 155- 160.
- Zheng, C. and Wang, P.P., 1999. *MT3DMS, a Modular Three Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminates in Groundwater Systems*. US Army Corps of Engineers, USA.
- Zheng, C. and Bennet, G.D., 2002. *Applied Contaminant Transport Modeling*. John Wiley & Sons, Inc., USA.





Environmental Sciences Vol.18 / No.4 / Winter 2021

55-68

Assessment of the vulnerability of groundwater resources to industrial pollutants of Sari oil reservoir

Mohammad Rahmani^{1*} and Tahereh Azari²

¹ Department of Environmental Sciences, Faculty of Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Mazandaran, Iran

² Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 2019.11.14

Accepted: 2020.01.21

Rahmani, M. and Azari, T., 2021. Assessment of the vulnerability of groundwater resources to industrial pollutants of Sari oil reservoir. *Environmental Sciences*. 18(4): 55-68.

Introduction: In Sari-Neka plain, the majority of the population are involved in agricultural activities. The Sari petroleum products distribution company is situated in the south of the plain with many storage tanks. Storage tanks are rather old and so oil leakage is likely to occur. In this research, the possibility of leakage and transport of dissolved hydrocarbons in the Sari aquifer was investigated.

Material and methods: Based on geological, geographical, and hydrological data, the conceptual model of the plain was first constructed, and then the numerical groundwater flow model of the aquifer was developed using MODFLOW. The isopotential map with the most accurate hydrogeological data in August 2004 was used for the steady-state calculation and a distribution map of the hydraulic conductivity was constructed. At the unsteady state, model calibration was conducted for the next 12 months following August 2004. The velocity field resulted from the flow model was used as input for the transport model, MT3DMS. Then, the model was applied for the TPH concentration in 14 years. Considering the advection process, hydrodynamic dispersion, and the process of adsorption, the MT3DMS model was calibrated by simulating the plume of TPH and the absorption rate was determined. Based on the value of the absorption rate, the fate of pollutants and the natural attenuation potential were evaluated. To predict the aquifer potential for natural attenuation in the next years, the model was run with the obtained absorption rate. Finally, the attenuation potential was presented in the form of a simple exponential equation. This equation could be a simple tool for practitioners to predict the natural changes in the concentration of TPH over time.

Results and discussion: According to the attenuation equation, the required time for clearing pollution with an initial concentration of 10 mg/L in the Sari aquifer was estimated 62 years and if there is no injection of

* Corresponding Author: *Email Address.* m.rahmani@umz.ac.ir
<http://doi.org.10.52547/envs.18.4.55>

pollutant into the aquifer in the coming years, in 2057, the pollution plume will be naturally cleared. Based on the calibrated parameters of the pollution model, the retardation factor in the Sari aquifer was calculated at 1.57. Also, the designed model can simulate each scenario of the pollutant injection and extraction. In order to predict the fate of TPH in the next years with the continuous injection of petroleum pollutants into the aquifer, the TPH concentration measured in March 2009 was considered as the initial concentration of the pollution model. Then, continuous injection of petroleum pollutants into the aquifer at a constant concentration of 10 mg/L was applied to the model at 10, 20-, 30-, 40-, and 60-years intervals. Finally, the pollution model was implemented and the distribution of pollution plume in the aquifer was predicted. The pollution model was also implemented by applying three scenarios of (1) increasing the injection concentration to 20,000 mg/m³, (2) 30% reducing the pumping rate of wells around the site, and (3) 30% increasing the Tajan River water level. These conditions caused changes in the concentration of pollutants and the spread of the pollution plume.

Conclusion: If there is a leakage and continuous injection of pollutants into the Sari aquifer in the next years and without monitoring the pollution plume within the site, it would further develop. However, by implementing projects such as pump and treat, its expansion can be prevented.

Keywords: Aquifer, Natural attenuation, Pollution plume, Sari oil reservoir, Transport model.