مقایسه توانایی روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای و مدل عددی در تعیین حریم حفاظتی چاه‌های شرب منطقه یافت‌آباد تهران

بهزاد دلخواهی[۱و*]، فرهاد اسدیان[۲] و کمال خدایی[۳]

۱. کارشناس ارشد آب زیرزمینی، شرکت آب منطقه‌ای استان تهران

۲. مربی گروه زمین‌شناسی محیطی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳. استادیار گروه زمین‌شناسی محیطی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی دانشگاه شهید بهشتی، تهران

تاریخ دریافت: ۹۱/۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۳

چکیده

یکی از بخش‌های مهم در سیاست‌های حفاظت از آب زیرزمینی به منظور جلوگیری از مخاطرات سلامتی و زیست‌محیطی، تعیین حریم حفاظتی چاه می باشد. در این تحقیق ضمن توصیف روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای و مدل عددی جهت تعیین حریم حفاظتی چاه، به منظور مقایسه روش‌های مذکور از داده‌های هشت حلقه از چاه‌های آب شرب منطقه یافت آباد تهران استفاده گردید. بدین‌منظور، میزان هم‌پوشانی حریم های حفاظتی شعاع ثابت و مدل عددی در محیط GIS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج هم‌پوشانی نشان می‌دهد که میزان کارآمدی و دقت روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، با افزایش فاصله از چاه کاهش می‌یابد. در هم‌پوشانی با زمان حرکت ۵۰ روز، ۸۸ درصد حریم ترسیم شده به روش مدل عددی توسط حریم شعاع ثابت محاسبه‌ای تسخیر می‌شود. درحالی‌که در حریم‌های حفاظتی ۱۰ سال، تنها ۴۱ درصد حریم ترسیمی به روش مدل عددی توسط روش شعاع ثابت تسخیر می‌شود. در صورت محدودیت زمان، سرمایه و اطلاعات کافی، روش شعاع ثابت محاسبه‌ای روش قابل قبولی تنها جهت ترسیم حریم‌های حفاظتی با زمان حرکت ۵۰ روز می باشد.

واژه‌های کلیدی: حریم حفاظتی چاه، زمان حرکت، شعاع ثابت محاسبه‌ای، مدل عددی، کارآمدی.

مقدمه

حفاظت کیفی از منابع آب زیرزمینی شهرها که برای تامین آب شرب استحصالی از چاه‌ها نقش دارند، امروزه از مسئولیت‌ها و دغدغه‌های فکری متولیان تامین و توزیع آب شرب یعنی سازمان‌های آب منطقه‌ای و شرکت‌های آب و فاضلاب کشور محسوب می شود. از آنجاکه بیشتر آلاینده‌ها به طور مستقیم یا غیر مستقیم از سطح زمین وارد سیستم آب زیرزمینی می‌شوند، یک روش مناسب به منظور حفاظت از منابع آب زیرزمینی، تعیین نواحی تامین‌کننده آب برای چاه‌های شرب و سپس اعمال محدودیت‌های کاربری اراضی و حفاظتی در داخل این نواحی می‌باشد. این محدوده از آبخوان را که آب مورد نیاز چاه را تامین می‌کند ناحیه تسخیر[1] می‌گویند. در واقع ناحیه تسخیر بخشی از آبخوان، در اطراف یک چاه است که آب و آلاینده‌ها از طریق آن وارد سیستم آب زیرزمینی می‌شوند و نهایتاً به داخل چاه راه پیدا می‌کنند. در حالت طبیعی ناحیه تسخیر از اندکی پائین‌دست چاه به سمت بالادست جریان و تا مرزهای طبیعی (سازند زمین شناسی، گسل، رودخانه، دریاچه و خطوط تقسیم آب زیرزمینی) توسعه می‌یابد؛ ولی در کاربردهای عملی معمولاً قسمت بالادست

* نویسنده مرتبط Behzad.delkhahi@gmail.com

1. Capture zone

ناحیه تسخیر را توسط معیار زمان حرکت[1] (مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک ذره آب یا آلاینده در جهت جریان آب زیرزمینی حرکت کرده و به چاه برسد) محدود می‌کنند. به‌عبارت دیگر تنها بخشی از ناحیه تسخیر که در آن ذرات آب یا آلاینده در طی زمانی مشخص به چاه خواهند رسید، درنظر می‌گیرند و به آن حریم حفاظتی چاه[2] می‌گویند.

به‌منظور ترسیم حریم حفاظتی چاه‌های شرب، چندین روش وجود داشته که به ترتیب افزایش هزینه، دقت و پیچیدگی شامل روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای[3] (CFR)، مدل‌های‌تحلیلی، نقشه‌های هیدروژئولوژی و مدل‌های عددی جریان می‌باشند. از میان روش‌های مذکور، مدل ریاضی عددی به دلیل در نظر گرفتن گرادیان‌هیدرولیکی، انواع شرایط مرزی و پارامترهای‌هیدرولیکی دارای تطابق بیشتری با شرایط واقعی هیدروژئولوژی آبخوان است و بهترین روش جهت تعیین حریم حفاظتی چاه محسوب می‌شود. با این حال روش‌های ساده‌تری مانند روش شعاع ثابت محاسبه‌ای (CFR) می توانند با استفاده از داده‌های هیدرولیکی و هزینه کمتر نتایج نسبتاً قابل قبولی ارائه دهند. انتخاب روش مناسب جهت تعیین حریم حفاظتی چاه تابع میزان داده‌های موجود، میزان پیچیدگی هیدروژئولوژی و سرمایه در اختیار می‌باشد. برخی از مطالعات صورت گرفته در ارتباط با مقایسه روش‌های تعیین حریم حفاظتی چاه به شرح زیر می‌باشند.

Bates and Evans (1996) مدل‌های تحلیلی GPTRAC، نیمه تحلیلی CAPZONE و عددی MODFLOW را با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که علی‌رغم هم اندازه بودن نواحی تسخیر ترسیم شده توسط سه مدل، شکل و تقارن آنها متفاوت از یکدیگر است که علت آن فرضیات و محاسبات متفاوت مورد استفاده در هر مدل می‌باشد. Miller (2003) ضمن مقایسه روش شعاع ثابت محاسبه‌ای با مدل‌های تحلیلی، به این نتیجه رسید که در زمان حرکت‌های طولانی، دقت روش شعاع ثابت به‌شدت کاهش می یابد. Moinante and Lobo-Ferreira (2005) نیز ضمن توصیف روش‌های مختلف ترسیم حریم حفاظتی چاه به مقایسه روش شعاع ثابت محاسبه‌ای و دو روش تحلیلی KLF[4] و Wyssling با مدل عددی دو بعدی ASMWIN پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در آبخوان‌های با شرایط هیدروژئولوژی پیچیده، در صورت وجود داده‌های مورد نیاز، استفاده از مدل عددی جهت تعیین حریم حفاظتی چاه از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد. ضمن اینکه روش‌های تحلیلی نیز کاربردوست می‌باشد و علی‌رغم درنظر گرفتن برخی فرضیات و ساده‌انگاریها، توانایی رسم حریم‌های حفاظتی با دقت قابل قبول را دارا می‌باشند.

Stroble and Robillard (2006) دقت و داده‌های مورد نیاز در روش‌های پیشنهادی توسط سازمان محیط زیست آمریکا (روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، روش شعاع ثابت اختیاری، مدل‌های تحلیلی و عددی) و روش‌های تحلیلی آلمانی (شامل روش‌های Wyssling, Spits, Mull و Rehse) را با یکدیگر مقایسه کرده و شرایط لازم جهت استفاده از آن ها و محدودیت‌های مرتبط به هر روش را توصیف کرد. وی به این نتیجه رسید که در آبخوان‌های با قابلیت انتقال بالا، از میان روش‌های آلمانی، تنها حریم‌های حفاظتی تعیین شده به روش Mull از انطباق مناسبی با حریم‌های حفاظتی رسم شده توسط مدل عددی برخوردار می‌باشد. در حالی که در آبخوان‌های با قابلیت انتقال پائین، تمامی روش‌های آلمانی به‌ویژه روش Wyssling دارای انطباق مناسبی با مدل‌های عددی می‌باشند. بدو (۱۳۸۳) نیز پس از توصیف معیارها و ویژگی روش‌های تعیین حریم حفاظتی چاه، با استفاده از داده‌های مربوط به چاه‌های شرب شهر ارومیه، روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، معادله تعادلی تایس و اشکال متغیر ساده شده (SVS) را با مدل تحلیلی WHPA مقایسه کرد. وی به این نتیجه رسید که حریم‌های حفاظتی ترسیم شده توسط روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، تایس و اشکال متغیر ساده شده به مراتب بزرگ تر از حریم‌های ترسیمی توسط مدل تحلیلی WHPA بوده لذا در صورت کافی بودن اطلاعات، استفاده از حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط مدل‌های تحلیلی، اقتصادی‌تر است. ناصری و قره محمودلو (۱۳۸۳) پس از توصیف روش‌های تعیین حریم حفاظتی چاه، فواصل حفاظتی چاه‌های شرب شهر ساری را با استفاده از روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای و تحلیلی محاسبه کردند. ایشان ضمن بررسی تاثیر عوامل هیدرولیکی آبخوان بر فواصل حفاظتی محاسبه شده، نحوه پراکنش هدایت الکتریکی، کلر و نیترات در نواحی حفاظتی چاه‌های آب شرب شهر ساری را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

در مقاله حاضر، ابتدا روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای (CFR) و مدل ریاضی عددی شرح داده شده است. سپس با استفاده از روش‌های مذکور، حریم حفاظتی با زمان حرکت‌های مختلف (۵۰ روز، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ سال) برای هشت حلقه از چاه‌های شرب منطقه یافت آباد تهران رسم شده و میزان دقت و درجه کارآمدی روش شعاع ثابت در مقایسه با روش استاندارد و پذیرفته شده مدل عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

روش مطالعه

روش شعاع ثابت محاسبه‌ای

روش شعاع ثابت محاسبه‌ای (CFR) روش نسبتا ساده‌ای است که برای بسیاری از منابع آب قابل استفاده می‌باشد. در این روش دایره‌ای در اطراف چاه رسم می‌شود که شعاع دایره براساس خصوصیات آبخوان و چاه محاسبه می‌شود. اساس این روش تخمین حجمی از آبخوان است که آب مورد نیاز یک چاه در

1. Time of travel
2. Wellhead protection area
3. Calculated Fixed Radius method
4. Krijgsman & Lobo-Ferreira

حال پمپاژ را در یک دوره زمانی معین، تامین می‌کند. اگر بخشی از آبخوان را که توسط چاه استخراج شده است به صورت یک استوانه در نظر گیریم، معادله روش شعاع ثابت محاسبه‌ای به شکل زیر خواهد بود (U.S. EPA,1987):

$$r = \sqrt{\frac{Q.t}{n.H.\pi}} \qquad \text{رابطه (۱)}$$

دراین رابطه r شعاع استوانه (متر)، Q میزان پمپاژ (مترمکعب بر روز)، H طول اسکرین یا بخش مشبک چاه (بر حسب متر، برای چاه هایی که در کل ضخامت آبخوان حفر نشده‌اند، ضخامت اشباع آبخوان در محل چاه مورد استفاده قرار می‌گیرد)، n تخلخل مواد آبخوان (بدون بعد) و t زمان حرکت (روز) می باشد. در این روش آبخوان همگن و همسان‌گرد (ایزوتروپ) و گرادیان هیدرولیکی ناچیز در نظر گرفته می‌شود، به‌همین دلیل حریم تعیین شده توسط این روش به شکل دایره خواهد بود (Mogheir and Tarazi, 2010). ولی در واقعیت آب زیرزمینی از مناطق مرتفع به سمت مناطق کم ارتفاع و هموار در جریان می‌باشد. در نتیجه گرادیان هیدرولیکی افقی در طبیعت وجود ندارد. پمپاژ در یک آبخوان باعث می‌شود تا ناحیه تسخیر چاه در سمت بالادست[1] آن گسترش بیشتری نسبت به پائین‌دست[2] پیدا کند که باعث می‌شود حریم حفاظتی یا ناحیه تسخیر چاه به شکل دایره نباشد(Theo dossiou and Latinopoulos, 2009). بنابراین استفاده از روش شعاع ثابت محاسبه‌شده (CFR) برای یک آبخوان با گرادیان جریان بالا سبب می‌شود تا حریم حفاظتی در بالادست چاه کمتر از اندازه واقعی و در سمت پائین‌دست آن، بیش از نیاز طبیعی باشد. این مسئله علاوه بر افزایش خطر ورود آلاینده ها از سمت بالادست چاه، باعث هدر رفت هزینه و وقت جهت حفاظت مناطق پائین‌دستی که خطری برای چاه ندارند، شود.

روش مدل عددی

امروزه مدل عددی بعنوان یک روش استاندارد جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه در بسیاری از نقاط دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد (Golder, 2001, Harter, 2002, Frind and Moham-mad, 2002). در این مدل ها معادله اصلی جریان آب زیرزمینی از طریق روش‌های تقریب زنی[3] به شکلی در می‌آید که به‌راحتی و به‌سرعت توسط یک کامپیوتر قابل حل باشد (محیط پیوسته مورد نظر به یک محیط ناپیوسته و گسسته با هزاران گره تبدیل شده و برای هر گره یک معادله جریان جداگانه تعریف می‌گردد). سپس با استفاده از ترکیب تکنیک‌های حل ماتریسی و تکرار[4]، معادلات جریان محاسبه شده و مقادیر متغیر مجهول (بار هیدرولیکی) برای هر گره به دست می‌آید. به منظور محاسبه ابعاد و شکل مناطق تسخیر با زمان‌های حرکت معین، معمولاً از یک برنامه کامپیوتری جداگانه استفاده می‌گردد که در آن بر پایه نتایج مدل جریان آب زیرزمینی (مقادیر بار هیدرولیکی و سرعت جریان آب زیرزمینی)، ابعاد مناطق تسخیر یا حریم‌های حفاظتی چاه رسم می‌گردد. از ویژگی‌های مدل‌های عددی، قابل استفاده بودن برای تمامی وضعیت‌های هیدروژئولوژی است. این مدل‌ها توانایی شبیه سازی سه بعدی جریان، مرزهای پیچیده و غیر خطی، چاه های ناقص، آبخوان‌های چند لایه، ناهمگن و ناهمسان‌گرد را دارا می‌باشند (Shuguang and Huasheng, 2012). براساس نتایج مطالعات و بررسی های انجام شده در ایالات متحده آمریکا مشخص شده است که حریم‌های حفاظتی تعیین شده توسط مدل عددی با حریم‌های حفاظتی واقعی چاه (که براساس آزمایش‌های ردیابی در محل چاه تعیین شده است) از انطباق بالایی برخوردار می‌باشد (Puchalski, 2009). لذا در صورت قابل اعتماد بودن و صحت داده‌های اولیه مورد استفاده، مدل عددی بهترین و مطمئن‌ترین روش جهت رسم حریم حفاظتی چاه محسوب می‌شود. مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق مدل GMS (نسخه ۶/۵) است که یک مدل جریان و انتقال سه بعدی است. این مدل دارای یک برنامه شبیه‌سازی جریان به روش تفاضل محدود[5] به نام MODFLOW و یک برنامه مکان‌یابی ذره‌ای[6] به نام MODPATH جهت محاسبه مسیرهای جریان آب زیرزمینی و زمان‌های حرکت می‌باشد. به منظور تهیه مدل جریان آب زیرزمینی، ابتدا کلیه داده‌های سطح آب زیرزمینی، پارامترهای هیدرولیکی و عناصر تغذیه و تخلیه آبخوان در بخشی از دشت تهران – کرج که چاه‌های مورد مطالعه در داخل آن حفر شده‌اند، از منابع مختلف جمع آوری، تصحیح و جهت ورود به مدل آماده گردید. در مرحله بعد پس از انتخاب ابعاد شبکه و شرایط مرزی مناسب، آبخوان منطقه مورد مطالعه در محیط نرم افزار GMS با استفاده از برنامه مدل‌سازی MODFLOW شبیه‌سازی شد. سپس ازطریق مقایسه مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده با مقادیر بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در پیزومترها (بار مشاهده‌ای) و اصلاح داده‌های اولیه ورودی به مدل و اجراهای متعدد آن، نهایتاً مدل جریان آب زیرزمینی منطقه مذکور واسنجی گردید. سپس نتایج مدل واسنجی شده به همراه تخلخل موثر مواد تشکیل دهنده آبخوان به‌عنوان داده اولیه وارد برنامه MODPATH شده و مسیرهای جریان آب زیرزمینی محاسبه و نهایتاً مناطق تسخیر چاه‌های مورد مطالعه با زمان حرکت‌های مختلف ۵۰ روز، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ سال ترسیم گردید. این برنامه مسیر حرکت ذرات آب یا آلاینده برای هر چاه شرب را ترسیم می‌کند که در واقع این مسیرهای حرکت ذرات، منطقه تسخیر چاه را مشخص می‌کنند. برای ترسیم منطقه تسخیر چاه، برنامه مذکور یک ذره فرضی مانند

1. Upgradient
2. Downgradient
3. Approximating
4. Iteration
5. Finite difference
6. Particle Tracking

یک مولکول آب را در نظر می‌گیرد که از یک نقطه مشخص، مطابق با سرعت محاسبه شده جریان آب زیرزمینی و در یک دوره زمانی معین شروع به حرکت می‌کند (در جهت جریان آب زیرزمینی). سپس برنامه، حرکت ذره از میان شبکه را ردیابی می‌کند. برنامه MODPATH از روش مکان‌یابی ذره‌ای معکوس برای این کار استفاده می‌کند. ردیابی معکوس شامل ردیابی ذرات آب در خلاف جهت جریان می‌باشد. با استفاده از روش ردیابی ذره‌ای معکوس می‌توان مناطقی از سیستم جریان آب زیرزمینی که هیچ آبی را برای چاه تامین نمی‌کنند (ذرات آب از این نقاط به سمت چاه حرکت نمی‌کنند یا مسیر حرکت ذرات آب یا آلاینده از این نقاط به سمت چاه نمی‌باشد)، مشخص کرد و از این طریق، سعی و خطای همراه با ردیابی ذره‌ای مستقیم برای تعیین نواحی تغذیه چاه، حذف خواهد شد (Bingham, 2010). از طریق انتخاب و تعیین تعدادی از ذرات آب در اطراف یک چاه و ردیابی معکوس، مرز خارجی منطقه تسخیر (حریم حفاظتی) مشخص می‌گردد.

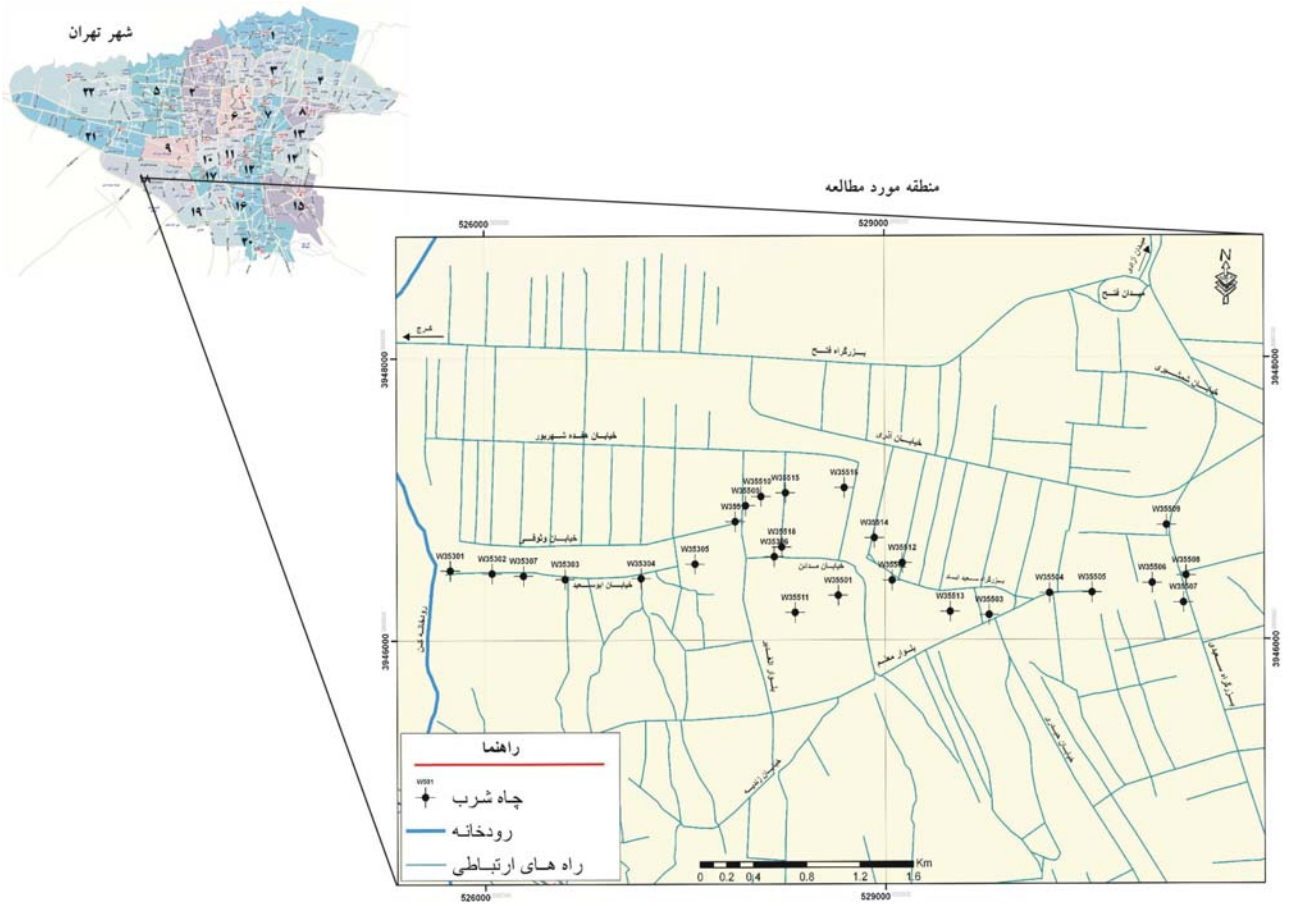
مشخصات چاه‌های مورد مطالعه

به منظور مقایسه روش‌های تعیین حریم حفاظتی از داده‌های هشت حلقه از چاه‌های شرب شهر تهران در منطقه یافت آباد استفاده شده است. چاه‌های مذکور در جنوب غرب شهر تهران و در حد فاصل بزرگراه فتح در شمال و بلوار معلم در جنوب واقع شده‌اند. رودخانه کن نیز در غرب منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۱). تمامی چاه‌های مورد مطالعه در داخل آبخوان آبرفتی دشت تهران - کرج حفر شده اند. از نظر زمین شناسی، رسوبات تشکیل دهنده آبخوان عمدتاً شامل شن، ماسه و به مقدار کمتر سیلت و رس هستند (از رودخانه کن به سمت شرق از اندازه رسوبات کاسته می‌شود).

در جدول ۱ مشخصات کلی چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است (براساس داده‌های جمع آوری شده از شرکت‌های آب منطقه ای و آب و فاضلاب شهر تهران و نتایج مدل عددی واسنجی شده مربوط به سال آبی ۸۷-۸۶). براین‌اساس عمق چاه‌ها بین ۲۳۰ تا ۲۷۰ متر و عمق برخورد به آب زیرزمینی بین ۱۱۸/۶۴ الی ۱۴۲/۴ متر می‌باشد (برای سال آبی ۸۷-۱۳۸۶). آبدهی متوسط چاه‌های مورد مطالعه در محدوده ۲۴۷۵ الی ۷۱۰۰ متر مکعب بر روز در تغییر است. متوسط ضخامت بخش اشباع آبخوان ۱۵۳ متر می‌باشد. هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال متوسط آبخوان به ترتیب ۲/۹۵ متر بر روز و ۴۵۵ متر مربع بر روز می‌باشند (جدول ۱).

نتایج و بحث

با توجه به نقش کلیدی موقعیت مکانی چاه در تعیین حریم



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی چاه‌های شرب منطقه یافت آباد تهران.

جدول ۱. مشخصات عمومی چاه‌های مورد مطالعه.

شماره چاه	utmx	utmy	عمق چاه (متر)	آبدهی (متر مکعب بر روز)	عمق آب (متر)	عمق سنگ کف (متر)	ضخامت آبخوان (متر)	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)	قابلیت انتقال (متر مربع بر روز)
W35511	۵۲۸۳۲۶	۳۹۴۶۱۹۵	۲۵۰	۳۳۷۵	۱۱۹/۶۶	۲۹۲/۶۵	۱۷۲/۹۹	۴/۸۹	۸۴۵/۹۲
W35516	۵۲۸۶۹۶	۳۹۴۷۰۸۰	۲۷۰	۴۰۵۰	۱۳۵/۵۴	۲۹۹/۹۶	۱۶۴/۴۲	۱/۵	۲۴۶/۶۳
W35512	۵۲۹۱۲۹	۳۹۴۶۵۴۷	۲۵۰	۳۱۵۰	۱۳۱/۷۸	۲۹۹/۷۷	۱۶۷/۹۹	۱/۵	۲۵۱/۹۹
W35304	۵۲۷۱۷۲	۳۹۴۶۴۳۷	۲۵۵	۴۵۰۰	۱۳۲/۵۷	۲۷۶/۱۸	۱۴۳/۶۱	۳/۱	۴۴۵/۱۹
W35307	۵۲۶۲۹۰	۳۹۴۶۴۵۷	۲۵۰	۳۶۰۰	۱۳۱/۴۵	۲۵۸/۳۷	۱۲۶/۹۲	۳/۱	۳۹۳/۹۴
W35301	۵۲۵۷۴۱	۳۹۴۶۴۹۴	۲۳۰	۷۱۰۰	۱۳۳/۳۳	۲۵۰/۷۳	۱۱۷/۴	۳/۱	۳۶۳/۹۴
W35500	۵۲۷۹۵۶	۳۹۴۶۹۵۲	۲۷۰	۳۰۰۰	۱۴۲/۴	۲۹۳/۶۷	۱۵۱/۲۷	۱/۵	۲۲۶/۹۱
W35501	۵۲۸۶۵۰	۳۹۴۶۳۱۶	۲۵۰	۲۴۷۵	۱۱۸/۶۴	۲۹۵/۸۲	۱۷۷/۱۸	۴/۸۹	۸۶۶/۴۱

حفاظتی، در ابتدا طی بازدید انجام شده موقعیت جغرافیایی چاه‌های شرب مورد مطالعه با دستگاه GPS تعیین گردید (در صورت نادرست بودن موقعیت چاه بر روی نقشه، حریم حفاظتی ترسیم شده نیز فاقد دقت کافی بوده و ممکن است با حریم حفاظتی واقعی چاه بر روی زمین مطابقت نداشته باشد). سپس مختصات چاه‌های مورد نظر بر روی نقشه پایه ایجاد شده در محیط نرم افزار ArcMap نسخه ۹/۲ پیاده گردید. بعد از آن حریم حفاظتی چاه‌های مورد نظر با زمان حرکتهای ۵۰ روز، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ سال با استفاده از مدل عددی GMS نسخه ۶/۵ رسم شد (ابتدا مدل جریان آب زیرزمینی برای سال آبی ۸۷-۸۶ با استفاده از برنامه MODFLOW تهیه و واسنجی گردید. سپس از نتایج مدل جریان با استفاده از برنامه MODPATH جهت ترسیم نواحی تسخیر و حریم‌های حفاظتی استفاده گردید.) سپس نتایج به صورت لایه‌های اطلاعاتی جداگانه وارد نرم افزار GIS گردید (شکل ۲).

پس از انجام مراحل فوق‌الذکر، با استفاده از رابطه (۱) برای هر هشت حلقه چاه مورد مطالعه، مقادیر شعاع ثابت در زمان حرکت‌های مذکور محاسبه گردید (جدول ۲). سپس براساس شعاع محاسبه شده، حریم‌های حفاظتی شعاع ثابت در محیط GIS رسم شد.

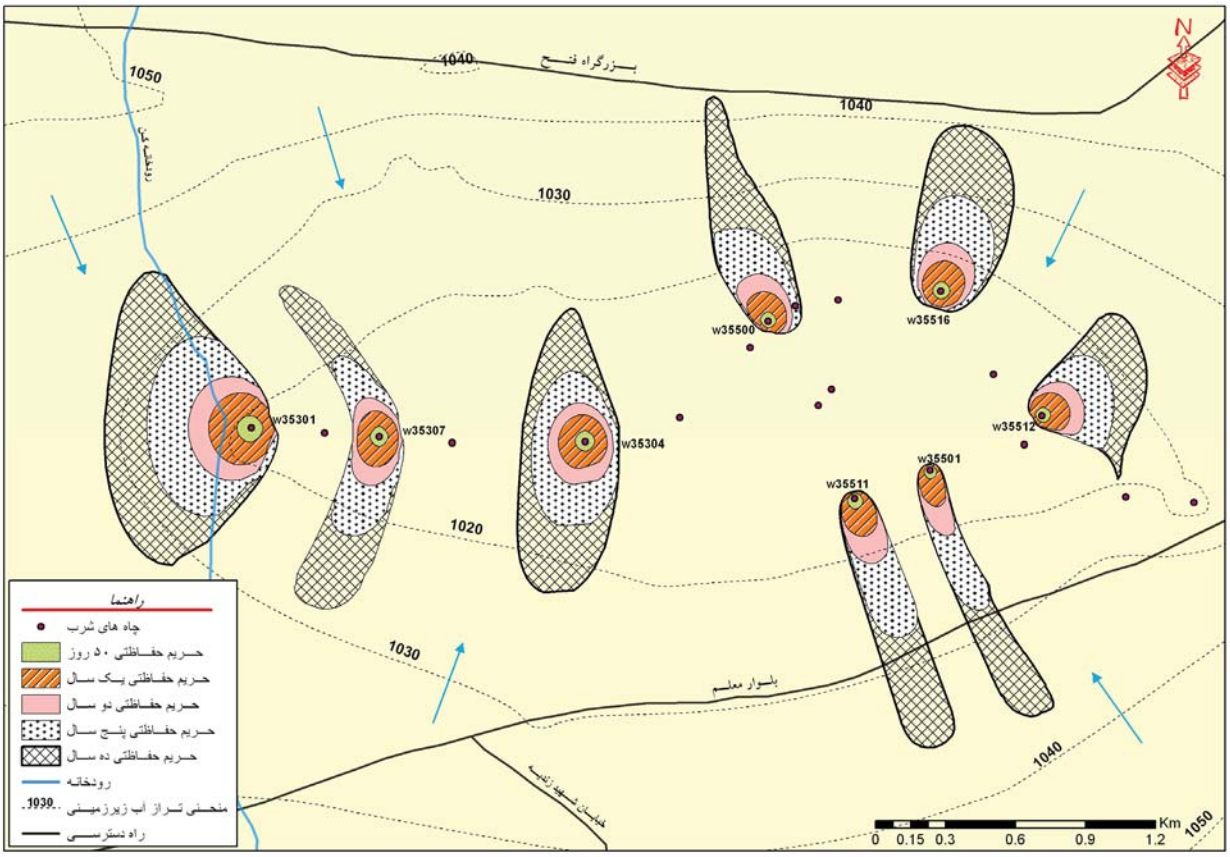
پس از رسم حریم‌های شعاع ثابت و وارد کردن حریم‌های مدل عددی در محیط GIS، به منظور مقایسه میزان هم‌پوشانی و محاسبه درصد کارآمدی[1] روش شعاع ثابت، از ابزار Intersect و Subtract موجود در بخش Graphic operation نرم‌افزار Arc-Map استفاده گردید.

از طریق ابزار مذکور امکان انتخاب بخش‌هایی از یک شکل

جدول ۲. فواصل حفاظتی محاسبه شده به روش شعاع ثابت محاسبه‌ای برای چاه‌های مورد مطالعه.

شماره چاه	زمان حرکت (روز)					
	۵۰	۱۸۲/۵	۳۶۵	۷۳۰	۱۸۲۵	۳۶۵۰
W35511	۳۲/۱۸	۶۱/۴۸	۸۶/۹۵	۱۲۲/۹۶	۱۹۴/۴۲	۲۷۴/۹۵
W35512	۳۱/۵۵	۶۰/۲۷	۸۵/۲۴	۱۲۰/۵۵	۱۹۰/۶	۲۶۹/۵۵
W35516	۳۶/۱۶	۶۹/۰۸	۹۷/۶۹	۱۳۸/۱۶	۲۱۸/۴۵	۳۰۸/۹۴
W35304	۴۰/۷۸	۷۷/۹۱	۱۱۰/۱۹	۱۵۵/۸۳	۲۴۶/۳۹	۳۴۸/۴۵
W35301	۳۸/۸	۷۴/۱۲	۱۰۴/۸۴	۱۴۸/۲۶	۲۳۴/۴۲	۳۳۱/۵۲
W35307	۵۷	۱۰۸/۲۴	۱۵۳/۰۸	۲۱۶/۴۸	۳۴۲/۲۹	۴۸۴/۱۰
W35501	۲۷/۲۳	۵۲/۰۲	۷۳/۵۷	۱۰۴/۰۴	۱۶۴/۵۱	۲۳۲/۶۵
W35500	۳۲/۴۳	۶۱/۹۶	۸۷/۶۳	۱۲۳/۹۳	۱۹۶/۰۲	۲۷۷/۲۱

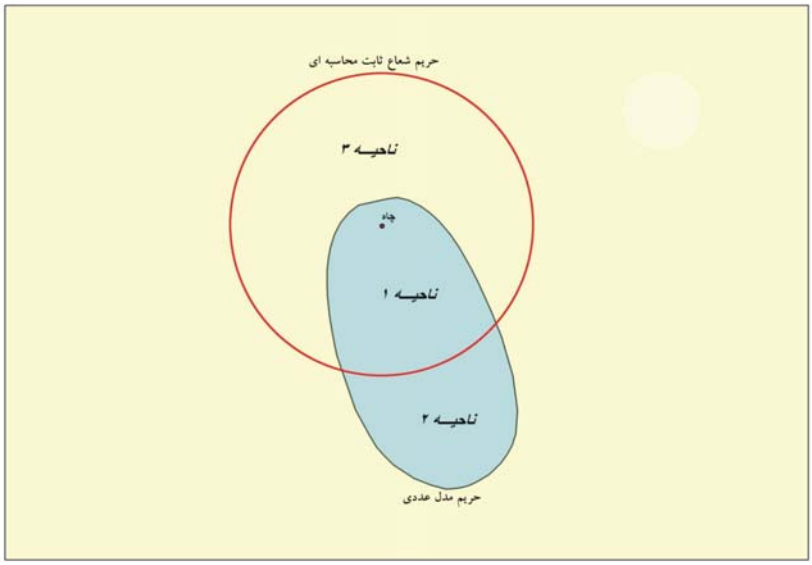
1. Effectiveness



شکل ۲. حریم حفاظتی عددی چاه‌های شرب منطقه یافت آباد تهران.

گرافیکی به‌صورت تعدادی چند ضلعی[1] مجزا میسر می‌گردد. با این روش می‌توان مساحت هر کدام از چند ضلعی‌های ایجاد شده را به‌صورت جداگانه محاسبه کرد. به‌عبارت دیگر مساحت حریم شعاع ثابت، حریم مدل عددی و بخش‌های دارای هم پوشانی و عدم هم‌پوشانی آن‌ها برای هر چاه محاسبه می‌شود. براین اساس سه ناحیه مطابق شکل ۳ استخراج گردید.

ناحیه ۱ شامل بخشی از حریم مدل عددی که توسط حریم شعاع ثابت تسخیر[2] شده است (دارای هم‌پوشانی). ناحیه ۲ شامل قسمتی از حریم مدل عددی که توسط حریم شعاع ثابت تسخیر نشده است (عدم هم‌پوشانی) و ناحیه ۳ شامل بخشی از



شکل ۳. نواحی مورد استفاده جهت محاسبه میزان کارآمدی روش شعاع ثابت محاسبه‌ای.

1. Polygon
2. Capture

جدول ۳. نتایج هم‌پوشانی حریم‌های شعاع ثابت و مدل عددی برای زمان حرکت ۱ سال.

شماره چاه	مساحت نواحی (متر مربع)				کارآمدی	عدم تسخیر	تسخیر اضافی
	۱ + ۲	۱	۲	۳	(درصد)		
W35511	۲۲۸۲۴	۱۲۰۱۱	۱۰۸۱۳	۱۱۷۶۴	۵۳	۴۷	۴۹
W35512	۲۱۲۸۴	۱۴۷۶۰	۶۵۲۴	۷۹۸۳	۶۹	۳۱	۳۵
W35516	۲۸۱۵۰	۲۲۶۹۱	۵۴۵۹	۷۲۶۷	۸۱	۱۹	۲۴
W35304	۳۶۷۳۳	۳۴۷۵۸	۱۹۷۵	۳۳۹۵	۹۵	۵	۹
W35301	۶۵۳۵۴	۵۵۹۶۳	۹۳۹۱	۱۷۷۰۵	۸۶	۱۴	۲۴
W35307	۳۲۸۶۹	۲۹۹۳۶	۲۹۳۳	۴۷۲۸	۹۱	۹	۱۴
W35501	۱۶۲۲۳	۸۲۸۴	۷۹۳۹	۸۷۷۲	۵۱	۴۹	۵۱
W35500	۲۲۱۴۸	۱۶۱۰۴	۶۰۴۴	۸۰۲۸	۷۳	۲۷	۳۳

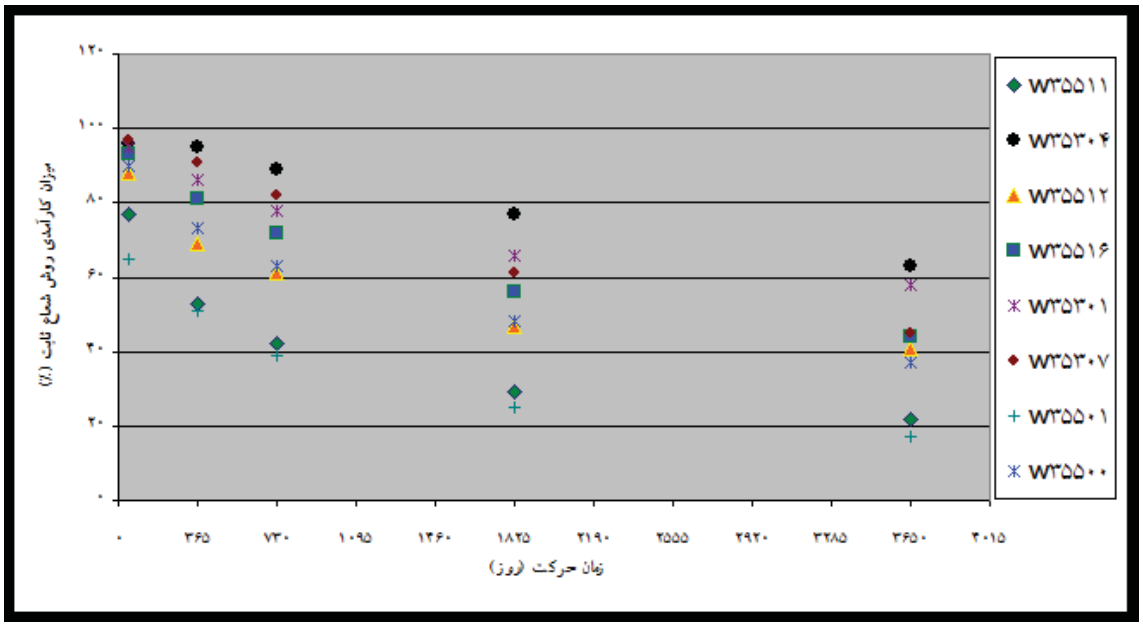
حریم شعاع ثابت که در خارج حریم مدل عددی قرار می‌گیرد (تسخیر اضافی[1]). مجموع مساحت نواحی ۱ و ۲ با مساحت حریم حفاظتی مدل عددی و مجموع مساحت نواحی ۱ و ۳ با مساحت حریم حفاظتی شعاع ثابت برابر می‌باشد. از طریق تقسیم مساحت ناحیه ۱ بر مساحت حریم مدل عددی، درصد هم‌پوشانی یا تسخیر (میزان کارآمدی) حریم شعاع ثابت به دست می‌آید. همچنین از تقسیم مساحت ناحیه ۲ بر مساحت حریم مدل عددی و مساحت ناحیه ۳ بر مساحت حریم شعاع ثابت به‌ترتیب درصد عدم هم‌پوشانی یا عدم تسخیر و درصد تسخیر اضافی حاصل می‌شود (شکل ۳). براین‌اساس بهترین هم‌پوشانی زمانی اتفاق می‌افتد که درصد تسخیر (کارآمدی) حداکثر و درصدهای عدم تسخیر و تسخیر اضافی حداقل باشد. در جدول ۳ نتایج هم‌پوشانی حریم‌های شعاع ثابت و مدل عددی برای زمان حرکت یک سال ارائه شده است.

براساس جدول ۳ حریم شعاع ثابت چاه شماره w ۳۵۳۰۴ با تسخیر ۹۵ درصد، عدم تسخیر ۵ درصد و تسخیر اضافی ۹ درصد دارای بهترین هم‌پوشانی با حریم مدل عددی است. در حالی که حریم شعاع ثابت چاه شماره w ۳۵۵۰۱ با تسخیر ۵۱ درصد، عدم تسخیر ۴۹ درصد و تسخیر اضافی ۵۱ درصد دارای کمترین هم‌پوشانی با حریم مدل عددی می‌باشد. به‌همین ترتیب در محیط GIS، برای زمان حرکت‌های ۵۰ روز، یک، دو، پنج و ده سال نیز درصد هم‌پوشانی و کارآمدی محاسبه گردیده است. با استفاده از نتایج محاسبات هم‌پوشانی برای چاه‌های مورد مطالعه، مقادیر متوسط درصدهای کارآمدی (تسخیر)، عدم تسخیر و تسخیر اضافی حریم‌های شعاع ثابت برای زمان حرکت‌های ۵۰ روز، یک، دو، پنج و ده سال محاسبه گردید (جدول ۴). همانطور که در جدول ۴ قابل مشاهده است، بهترین هم‌پوشانی حریم شعاع ثابت با حریم مدل عددی، در زمان حرکت ۵۰ روز و به ازای تسخیر، عدم تسخیر و تسخیر اضافی به ترتیب ۸۷/۶۳، ۱۲/۳۸ و ۱۲/۲۵ درصد ایجاد شده است. در واقع در زمان حرکت ۵۰ روز، میزان کارآمدی روش شعاع ثابت حداکثر و میزان عدم تسخیر و تسخیر اضافی آن حداقل می‌باشد. در عوض، کمترین هم‌پوشانی حریم شعاع ثابت با مدل عددی، به ازای زمان حرکت ۱۰ سال ایجاد شده است. در زمان حرکت ۱۰ سال، میزان کارآمدی روش شعاع

جدول ۴. مقادیر متوسط تسخیر، عدم تسخیر و تسخیر اضافی حریم‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای.

زمان حرکت (روز)	تسخیر	عدم تسخیر	تسخیر اضافی
	(درصد)		
۵۰	۸۷/۶۳	۱۲/۳۸	۱۲/۲۵
۳۶۵	۷۴/۸۸	۲۵/۱۳	۲۹/۸۸
۷۳۰	۶۵/۷۵	۳۴/۲۵	۳۹/۱۳
۱۸۲۵	۵۱/۱۳	۴۸/۸۸	۵۳/۱۳
۳۶۵۰	۴۰/۸۸	۵۹/۱۳	۶۲/۸۸

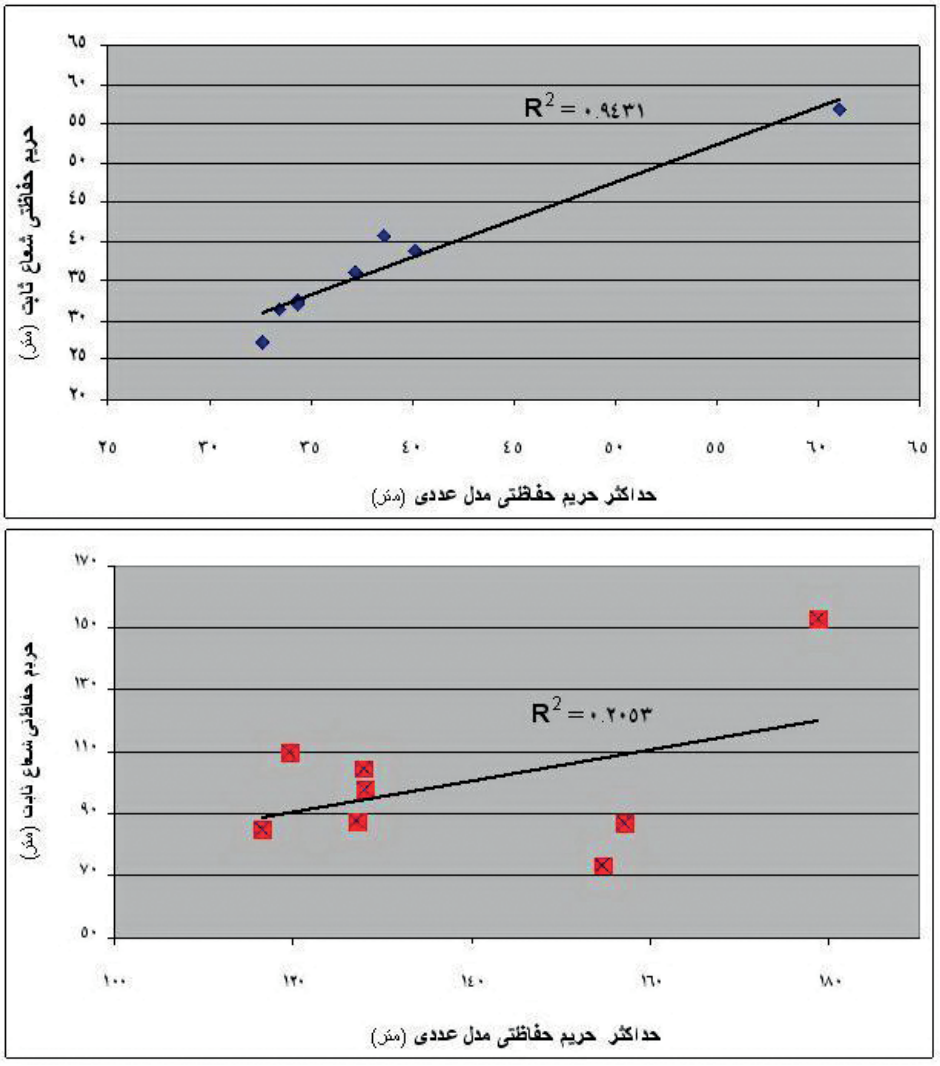
1. Overcapture



شکل ۴. تغییرات کارآمدی روش شعاع ثابت برای چاه‌های مورد مطالعه به ازای زمان حرکت‌های مختلف.

الف

ب



شکل ۵. میزان همبستگی حریم‌های حفاظتی مدل عددی با حریم‌های حفاظتی شعاع ثابت برای زمان حرکت الف) ۵۰ روز و ب) یک سال.

ثابت برابر با ۴۰/۸۸ درصد و میزان عدم تسخیر و تسخیر اضافی آن به ترتیب برابر با ۵۹/۱۳ و ۶۲/۸۸ درصد است. به‌عبارت دیگر، با افزایش فاصله از چاه (افزایش زمان حرکت)، از میزان دقت و کارآمدی روش شعاع ثابت محاسبه‌ای کاسته می‌شود.

در شکل ۴ تغییرات کارآمدی روش شعاع ثابت برای چاه‌های مورد مطالعه به ازای زمان حرکت‌های مختلف نشان داده شده است. براساس شکل ۴، همانطورکه قبلاً نیز گفته شد با افزایش زمان حرکت، کارآمدی روش شعاع ثابت کاهش می‌یابد. به طوری که بیشترین کارآمدی برابر با ۹۷ درصد مربوط به چاه شماره w ۳۵۳۰۴ در زمان حرکت ۵۰ روز و کمترین مقدار آن برابر با ۱۷ درصد مربوط به چاه شماره w ۳۵۵۰۱ در زمان حرکت ۱۰ سال می‌باشد.

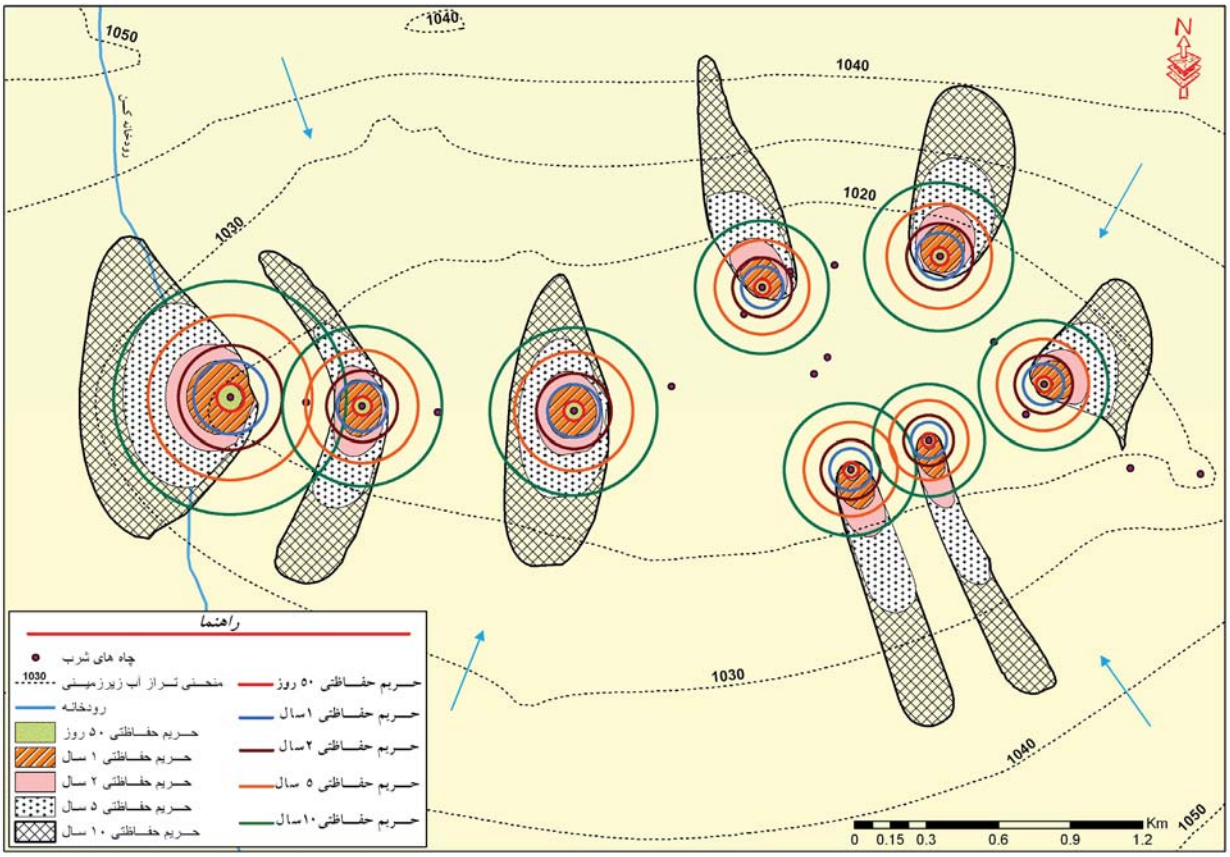
در زمان حرکت ۵۰ روز، کارآمدی ۶ حلقه از ۸ حلقه چاه مورد مطالعه بیش از ۹۰ درصد می‌باشد. مقدار متوسط کارآمدی شعاع ثابت در زمان حرکت یک سال برابر با ۷۵ درصد بوده که این مقدار به ازای زمان حرکت ۱۰ سال به کمتر از ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. در شکل ۵ میزان همبستگی حریم‌های حفاظتی ترسیم شده به روش مدل عددی با حریم‌های شعاع ثابت ۵۰ روز و ۱ سال نشان داده شده است. براین‌اساس، ضریب همبستگی حریم شعاع ثابت در زمان حرکت۵۰ روز با حریم حفاظتی مدل عددی (حریم حفاظتی بالادست چاه که توسط مدل عددی محاسبه شده است) برابر با ۰/۹۴ بوده که این مقدار در زمان حرکت یک سال به شدت کاهش یافته و به حدود ۰/۲۱ می‌رسد.

همچنین در جدول ۵ فواصل حفاظتی شعاع ثابت با فواصل حفاظتی بالادست مدل عددی برای زمان حرکت‌های ۵۰ روز، یک و ده سال با یکدیگر مقایسه شده است. براین‌اساس، در تمامی زمان سیرهای مذکور، فواصل حفاظتی شعاع ثابت همواره کوچک تر از فواصل حفاظتی بالادست محاسبه شده توسط مدل عددی است. به‌عبارت دیگر حریم ترسیمی توسط روش شعاع ثابت، بخش قابل ملاحظه‌ای از حریم حفاظتی مدل عددی در بخش بالادست چاه را دربر نمی‌گیرد که این مسئله باعث افزایش خطر ورود آلاینده ها از سمت بالادست چاه می‌گردد. طبق جدول ۵، متوسط اختلاف فواصل حفاظتی شعاع ثابت و مدل عددی به ازای زمان حرکت ۵۰ روز تنها برابر با ۱/۹۶ متر بوده که این اختلاف در زمان سیر یک سال برابر با ۳۸/۷۷ متر و در زمان سیر ده سال به بیش از ۵۵۰ متر می‌رسد.

در شکل ۶ وضعیت هم‌پوشانی حریم‌های شعاع ثابت با حریم‌های مدل عددی چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. همانطورکه در شکل ۶ نیز قابل مشاهده است، قسمت‌های قابل ملاحظه‌ای از حریم حفاظتی مدل عددی در بخش بالادست چاه‌های مورد مطالعه (خلاف جهت جریان آب زیرزمینی)، توسط حریم‌های شعاع ثابت پوشش داده نشده است. این درحالی است که حریم‌های شعاع ثابت، بخش‌های غیر ضروری پائین‌دست چاه که جزء حریم حفاظتی واقعی چاه به حساب نمی آیند را دربر می‌گیرند. با توجه به موارد فوق‌الذکر، حریم حفاظتی رسم شده به روش شعاع ثابت محاسبه‌ای در زمان حرکت ۵۰ روز از انطباق مناسبی با حریم حفاظتی چاه که توسط مدل عددی رسم شده است، برخوردار می‌باشد. ولی با افزایش زمان حرکت به‌دلیل کشیدگی حریم حفاظتی در خلاف جهت جریان آب زیرزمینی و انحراف آن از شکل دایره، از تطابق حریم شعاع ثابت با حریم مدل عددی به‌شدت کاسته شده و با توجه به نادیده گرفته شدن بخش قابل توجهی از حریم حفاظتی در بالادست چاه، استفاده از روش شعاع ثابت برای زمان حرکت‌های بالاتر از ۵۰ روز پیشنهاد نمی‌گردد. با این وجود، از حریم‌های شعاع ثابت ۵۰ روز می‌توان جهت محافظت از چاه شرب، در مقابل ورود مستقیم آلاینده‌ها از طریق رواناب‌های سطحی یا نشت از مخازن نزدیک چاه استفاده کرد. به‌علاوه زمان حرکت ۵۰ روز به این معنی است که ۵۰ روز طول می‌کشد تا عامل آلاینده رها شده در داخل زمین قبل از نابود

جدول ۵. مقایسه فواصل حفاظتی شعاع ثابت و مدل عددی برای زمان حرکت‌های ۵۰، ۳۶۵ و ۳۶۵۰ روز.

شماره چاه	شعاع ثابت (متر)			مدل عددی (متر)		
	۵۰	۳۶۵	۳۶۵۰	۵۰	۳۶۵	۳۶۵۰
W35511	۳۲/۱۸	۸۶/۹۵	۲۷۵	۳۴/۳۴	۱۵۶/۹۴	۱۱۱۷
W35512	۳۱/۵۵	۸۵/۲۴	۲۶۹/۶	۳۳/۴۲	۱۶۶/۴۴	۵۸۰/۲۷
W35516	۳۶/۱۶	۹۷/۶۹	۳۰۸/۹	۳۷/۲۲	۱۲۸/۰۷	۷۲۳/۶۵
W35304	۴۰/۷۸	۱۱۰/۱۹	۳۴۸/۵	۳۸/۶۱	۱۱۹/۶۲	۶۷۰/۴۵
W35307	۳۸/۸	۱۰۴/۸۴	۳۳۱/۵	۴۰/۱۸	۱۲۷/۸۳	۷۷۹/۳۵
W35301	۵۷	۱۵۳/۰۸	۴۸۴/۱	۶۱/۰۴	۱۷۸/۶۸	۸۵۳/۰۳
W35501	۲۷/۲۳	۷۳/۵۷	۲۳۲/۷	۳۲/۶۵	۱۵۴/۶۲	۱۱۵۹
W35500	۳۲/۴۳	۸۷/۶۳	۲۷۷/۲	۳۴/۳۸	۱۲۷/۱۲	۱۰۴۵/۲



شکل ۶. وضعیت هم‌پوشانی حریم‌های شعاع ثابت با حریم‌های مدل عددی چاه‌های مورد مطالعه.

شدن، از یک نقطه در اطراف چاه به آن برسد. این زمان از نظر حذف باکتری‌های بیماری‌زا[1] دارای اهمیت می‌باشد (Gebra and Yates,1991).

با توجه به واقع شدن چاه‌های شرب مورد مطالعه در داخل بافت مسکونی منطقه یافت‌آباد و فراوانی چاه‌های جذبی دفع فاضلاب خانگی در پیرامون چاه‌های مذکور، تعیین حریم حفاظتی مناسب برای جلوگیری از رسیدن و ورود باکتری‌های بیماری‌زا به داخل چاه ضروری است. زیرا اکثر باکتری‌های بیماری‌زا بیش از ۵۰ روز در آب زیرزمینی زنده نمی‌مانند. به‌عنوان مثال، باکتری کلی‌فرم پس از مدت کمتر از ۸ روز به میزان ۹۹/۹ درصد حذف می‌شود، در صورتی که باکتری E.Coli به مدت زمان پنجاه روز نیاز دارد تا به همان میزان حذف شود. بنابراین حریم‌های شعاع ثابت ۵۰ روز برای محافظت از چاههای شرب در مقابل ورود باکتری‌های بیماری زا نیز مناسب می‌باشند. به‌طورکلی به دلیل درنظر گرفتن اکثر پارامترهای آبخوان و جریان آب زیرزمینی، در صورت در اختیار داشتن داده‌های کافی و قابل اعتماد، مدل عددی بهترین روش جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه می‌باشد. با این حال در صورت نبود داده و عدم شناخت کافی از شرایط آبخوان، روش شعاع ثابت محاسبه‌ای نیز جهت رسم حریم حفاظتی چاه با زمان حرکت ۵۰ روز، قابل استفاده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این تحقیق، فواصل حفاظتی محاسبه شده به‌وسیله روش شعاع ثابت همواره کوچک‌تر از فواصل حفاظتی بالادست محاسبه شده توسط مدل عددی است. این مسئله باعث نادیده گرفته شدن بخش‌های قابل ملاحظه‌ای از حریم حفاظتی واقع در بالادست چاه می‌شود و احتمال ورود آلاینده‌ها به داخل چاه از طریق این نواحی وجود خواهد داشت. میزان کارآمدی روش شعاع ثابت با افزایش زمان حرکت (فاصله از چاه) کاهش می‌یابد. مقایسه هم‌پوشانی حریم‌های شعاع ثابت و مدل‌عددی در محیط GIS نشان می‌دهد که میزان کارآمدی متوسط روش شعاع ثابت در زمان حرکت ۵۰ روز برابر با ۸۸ درصد است که این مقدار در زمان حرکت ۱۰ سال، به کمتر از ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین میزان عدم تسخیر و تسخیر اضافی حریم‌های حفاظتی شعاع ثابت با افزایش زمان حرکت افزایش می‌یابد. براساس نتایج به‌دست آمده، روش شعاع ثابت محاسبه‌ای جهت رسم حریم حفاظتی چاه با زمان حرکت ۵۰ روز از دقت قابل قبولی برخوردار است ولی در زمان حرکت‌های بالاتر، به دلیل کاهش دقت، استفاده از این روش توصیه نمی‌شود. به‌طورکلی روش مدل عددی مناسب‌ترین روش جهت تعیین حریم حفاظتی چاه به‌حساب می‌آید. با این وجود، در مقایسه با سایر روش‌ها، این روش نیازمند تخصص و تجربه بالاتر و صرف زمان و هزینه

1. Patogenic

بیشتری است و استفاده از این روش فقط زمانی توصیه می‌شود که اطلاعات کافی و مورد نیاز در منطقه مورد نظر وجود داشته باشد. زمانی که بخش عمده‌ای از داده‌های ورودی باید تخمین زده شود؛ روش شعاع ثابت محاسبه‌ای نیز همان دقت مدل‌های عددی را در رسم حریم حفاظتی با زمان حرکت ۵۰ روز فراهم خواهد کرد.

منابع

– بدو، ک.، ۱۳۸۳. مبانی محاسبات حریم بهداشتی برای حفاظت کیفی چاه‌های آب شرب در شهرها. مجله استقلال، ۲۳، ۲، صفحات ۹۱–۷۷.

– ناصری، ح. و قره محمودلو، م.، ۱۳۸۳. تعیین حریم بهداشتی چاه‌های آب شرب (مطالعه موردی: شهر ساری). هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

- Bates, J.K. and Evans, J.E., 1996. Evaluation of wellhead protection area delineation methods, applied to the municipal well field at Elmore, Ottawa County, Ohio. Ohio Journal of Science, 96, 13-22.

- Bingham, M., 2010. Vulnerability assessment and scoring of wellhead protection areas City of Hamilton, Ontario, Earthfx Incorporated, 25-53.

- Frind, E.O. and Mohammad, D.S., 2002. Delineation of three-dimensional well capture zone for complex multi-aquifer systems. Ground Water Journal, 40, 6, 586-598.

- Gebra, C.P. and Yates, M.V., 1991. Quantitation of factors controlling viral and bacterial transport in the subsurface, in modeling the environmental fate of microorganisms. American Society of Microbiology, 23, 77-87.

- Golder Associates Ltd., 2001. Phase II groundwater protection study, County of Oxford, Ontario,Canada.

- Harter, T., 2002. Delineating groundwater sources and protection zones, California, Department of Health Services.

- Miller, CH.W., 2003. A comparison of wellhead protection area delineation methods for public drinking water systems in Whatcom County,Washington. Journal of Environmental Health, 66, 2, 17-23.

- Mogheir, Y. and Tarazi, G., 2010. Comparative identification of wellhead protection area for municipal supply wells in Gaza. Journal of Water Resource and Protection, 2, 105-114.

- Moinante, M.J. and Lobo-Ferreira, J. P., 2005. On wellhead protection assessment methods and a case-study application in Montemor-o-Novo,Portugal. The fourth inter-celtic colloquium on hydrology and management of water resources, 21-34.

- Puchalski, G., 2009. Wellhead protection plan for the City of Barrett. Minnesota Deppartment of Health, 2-16.

- Shuguang, L. and Huasheng, L., 2012. Wellhead protection area delineation using available data. MSU College of Engineering, Michigan DEQ, USA.

- Stroble, R.O. and Robillard, P.D., 2006. Comparison of several EPA-recommended US and German wellhead protection area delineation methods in agricultural settings. Tech Science Press, USA.

- Theodossiou, N. and Latinopoulos, D., 2009. Economic aspects of the delineation of wellhead protection areas under conditions of uncertainty. Proceedings of the second International CEMEPE & SECOTOX Conference, Mykonos, 309-314.

- U.S. Enviromental Protection Agency., 1987. Guidance for delineation of wellhead protection areas. U.S. EPA, Office of Groundwater Protection, Washington, D.C.