تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نهم، شماره ۲، پائیز ۱۳۹۲
Volume 9, No. 2, Fall 2013 (IR-WRR)
۲۷-۴۱

مقایسه روشهای ترسیم حریم حفاظتی چاه؛ مطالعه موردی: چاه‌های شرب شهر همدان

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

چکیده

حریم حفاظتی چاه، ناحیه سطحی و یا زیر سطحی پیرامون چاه است که در هنگام پمپاژ، آب چاه را تامین نموده و مواد آلاینده از طریق آن وارد سیستم آب زیرزمینی شده و نهایتاً به داخل چاه راه پیدا خواهند کرد. در این تحقیق ضمن معرفی روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، روش‌های تحلیلی KLF و Wyssling و روش مدل عددی به عنوان متداول‌ترین روش‌ها جهت تعیین حریم حفاظتی چاه، به منظور مقایسه روش‌های مذکور از داده‌های نه حلقه از چاه‌های شرب شهر همدان استفاده گردید. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش زمان حرکت (افزایش فاصله از چاه)، از دقت و تطابق روش‌های شعاع ثابت و تحلیلی نسبت به مدل عددی کاسته می‌شود. حریم ترسیمی توسط روش شعاع ثابت محاسبه ای بخش قابل ملاحظه ای از حریم حفاظتی ترسیم شده توسط مدل عددی در بخش بالادست چاه را در برنمی‌گیرد. درحالیکه بخش‌های غیرضروری در پائین دست چاه را که جزء حریم حفاظتی واقعی چاه نمی‌باشد را شامل می‌شود. همچنین حریم‌های ترسیمی توسط روش‌های تحلیلی KLF و Wyssling علیرغم اینکه در مقایسه با روش شعاع ثابت، مساحت بیشتری از حریم حفاظتی مدل عددی را پوشش می‌دهند؛ ولی از نظر شکل ظاهری باریک و کشیده بوده و بخش قابل ملاحظه‌ای از فواصل جانبی حریم حفاظتی عددی را دربرنمی‌گیرند. بطور کلی مدل عددی دقیق ترین روش جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه می‌باشد ولی در صورت عدم وجود داده، زمان، سرمایه و تخصص کافی استفاده از روشهای ساده‌تری مانند روش‌های شعاع ثابت و تحلیلی نیز از دقت قابل قبول برخوردار خواهد بود.

کلمات کلیدی: ناحیه تسخیر، حریم حفاظتی چاه، روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، روش تحلیلی، مدل عددی، زمان حرکت.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۰ اردیبهشت ۱۳۹۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲

۱- کارشناس حفاظت از آبهای زیرزمینی، شرکت آب منطقه ای استان تهران، تهران، ایران.
۲- عضو هیئت علمی پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول

A Comparison of Delineation Methods for Wellhead Protection Area
Case Study: Drinking Wells of Hamedan City

B. Delkhahi [1], K. Khodaei [2] and F. Asadian [2]*

Abstract

Well Head Protection (WHP) area, is a surface or subsurface area around a well which supplies extracted water from a well and therefore the pollutants entering the groundwater in this area would finally pump out from the well. In this study while introducing calculated fixed radious (CFR) method for determining WHP area of a single well, other conventional methods like analytical methods (Wyssling and KLF) and numerical models are also compared using nine pumping wells suppling drinking water for Hamedan city, Iran. The results indicated that by increasing the time of travel (increasing distance from a well), calculated fixed radious and analytical methods would lose their accuracy compared to the numerical modeling. CFR calculated values indicated under-protection on the upgradient side and over-protection on the downgradient side of a well head protection area. Moreover, in spite of the fact that the protection areas which calculated by KLF and Wyssling analytical methods, compared to the fixed radius method, are covering further area compared to the calculated protection area by numerical models, the narrow extended shape showed that the results does not cover considerable lateral distances of calculated protection area. Generally, the numerical models are the most accurate methods to draw well head protection area. In case of insufficient data, time, fund, and knowledge, however applying simpler methods like calculated fixed radius method and analytical methods would also lead to acceptable results.

Keywords: Capture zone, Wellhead protection area, Calculated fixed radius method, Analytical method, Numerical model, Time of travel.

Received: April 29, 2012
Accepted: May 11, 2013

1- M.Sc in Hydrogeology, Tehran Regional Water Company, Tehran, Iran. Email:behzad.delkhahi@gmail.com
2 - Research Instructor, Research Institute of Applied Science, Shahid Beheshti University,Tehran,Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

حفاظت کیفی از منابع آب زیرزمینی شهرها که برای تامین آب شرب استحصالی از چاه‌ها نقش دارند، امـــروزه از مسئولیتها و دغـدغه‌های فکری متولیان تـامین و تـوزیع آب شرب یعنی سازمان‌های آب منطقه‌ای و شرکتهای آب و فاضلاب کشور محسوب می‌شود. از آنجایی‌که بیشتر آلاینده‌ها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از سطح زمین وارد سیستم آب زیرزمینی می‌شوند، یک روش مناسب به منظور حفاظت از منابع آب زیرزمینی، تعیین مناطق تأمین‌کننده آب برای چاه‌های شرب و سپس اعمال محدودیت‌های کاربری اراضی و حفاظتی در داخل این مناطق می‌باشد. این محدوده از آبخوان را که آب مورد نیاز چاه را تامین می‌کند ناحیه تسخیر[۱] می‌نامند. در واقع ناحیه تسخیر بخشی از آبخوان در اطراف یک چاه است که آب و آلاینده‌ها از طریق آن وارد سیستم آب زیرزمینی شده و نهایتاً به داخل چاه راه پیدا می‌کنند. در شرایط طبیعی ناحیه تسخیر از اندکی پائین دست چاه به سمت بالادست جریان و تا مرزهای هیدرولوژیکی توسعه می‌یابد؛ ولی در کاربردهای عملی معمولاً قسمت بالا دست ناحیه تسخیر را توسط معیار زمان حرکت[۲] (مدت زمانیکه طول می‌کشد تا یک ذره آب یا آلاینده در جهت جریان آب زیرزمینی حرکت کرده و به چاه برسد) محدوده می‌کنند. به عبارت دیگر تنها بخشی از ناحیه تسخیر را که در آن ذرات آب یا آلاینده در طی زمانی مشخص به چاه خواهند رسید را درنظر می‌گیرند که به آن حریم حفاظتی چاه[۳] می‌گویند. به منظور ترسیم حریم حفاظتی چاه‌های شرب شش روش موجود بوده که به ترتیب افزایش هزینه، دقت و پیچیدگی شامل روشهای شعاع ثابت اختیاری (AFR)[۴]، شعاع ثابت محاسبه‌ای (CFR)[۵]، اشکال متغیر ساده شده (SVS)[۶]، ترسیم نقشه هیدروژئولوژیکی (HM)[۷] ، روشهای تحلیلی (AM)[۸] و مدلهای عددی (NM)[۹] می‌باشند (U.S EPA, 1987). از میان روشهای مذکور، مدل ریاضی عددی به دلیل در نظر گرفتن گرادیان هیدرولیکی، شرایط مرزی و پارامترهای هیدرولیکی آبخوان، از تطابق بیشتری با شرایط واقعی هیدروژئولوژیکی آبخوان برخوردار بوده و مناسب ترین روش جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه محسوب می‌شود. با این حال روش‌های ساده‌تری مانند روش شعاع ثابت محاسبه‌ای (CFR) می‌توانند با استفاده از داده‌های هیدرولیکی و هزینه کمتر نتایج نسبتاً قابل قبولی ارائه دهند. انتخاب روش مناسب جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه تابع میزان داده‌های موجود، میزان پیچیدگی هیدروژئولوژیکی و سرمایه در اختیار می‌باشد. برخی از مطالعات صورت گرفته در ارتباط با مقایسه روشهای ترسیم حریم حفاظتی چاه به شرح زیر می‌باشند.

Springer and Bair (1992) سه مدل جریان- انتقال تحلیلی (CAPZONE/GWPATH)، نیمه تحلیلی(RESSQC/DREAM) و عددی (MODFLOW/MODPATH) را با یکدیگر مقایسه نمود. براساس یافته‌های ایشان، منطقه تسخیر ترسیم شده توسط مدلهای تحلیلی و نیمه تحلیلی به دلیل درنظر نگرفتن تغییرات مکانی ضریب قابلیت انتقال و تخلخل، به مراتب کوچکتر از منطقه تسخیـــر واقعـــی ترسیم شده توسط مدل عـــددی می‌باشد. Bates and Evans (1996) مدل‌های تحلیلی GPTRAC[۱۰]، نیمه تحلیلی[۱۱] CAPZONE [۱۲] و عددی MODFLOW [۱۳] را با یکدیگر مقایسه نمود. وی به این نتیجه رسید که علیرغم هم اندازه بودن نواحی تسخیر ترسیم شده توسط سه مدل، شکل و تقارن آنها متفاوت از یکدیگر بوده که علت آن فرضیات و محاسبات متفاوت مورد استفاده در هر مدل می‌باشد. Harter (2002) ضمن معرفی و تشریح روشهای مختلف ترسیم حریم حفاظتی، تأثیر گرادیان هیدرولیکی آبخوان بر روی شکل حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط روشهای شعاع ثابت محاسبه‌ای و مدل عددی را بررسی نمود. براساس نتایج تحقیق مذکور، در گرادیان‌های هیدرولیکی کمتر از ۰/۰۵ درصد، شکل حریم حفاظتی ترسیم شده به دو روش مدل عددی و شعاع ثابت محاسبه‌ای تقریباً دایره ای است. ولی با افزایش گرادیان هیدرولیکی شکل حریم حفاظتی ترسیمی توسط مدل عددی از حالت دایره‌ای خارج شده و به سمت بالادست جریان آب زیرزمینی کشیده می‌شود. لذا با افزایش گرادیان هیدرولیکی از میزان انطباق حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط دو روش مذکور به شدت کاسته می‌شود. Moinante and Lobo-ferreira (2005) نیز ضمن توصیف روشهای مختلف ترسیم حریم حفاظتی چاه به مقایسه دو مدل تحلیلی KLF[۱۴] و Wyssling با مدل عددی ASMWIN [۱۵] پرداخته و معایب و مزایای هر روش را مورد بررسی قرار دادند. Stroble (2006) دقت، هزینه و داده‌های مورد نیاز در روش‌های پیشنهادی توسط سازمان محیط زیست آمریکا و روش‌های تحلیلی آلمانی را با یکدیگر مقایسه نموده و شرایط لازم جهت استفاده از آنها و محدودیت‌های مرتبط به هر روش را توصیف نمود. وی به این نتیجه رسید که استفاده از روش‌های آلمانی جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه‌های شرب شخصی، به دلیل سادگی و کم هزینه بودن این روش‌ها مفید می‌باشد. Mogheir (2010) از سه روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، تحلیلی KLF و مدل المان تحلیلی[۱۶] برای ترسیم حریم حفاظتی چاه‌های شرب شهر غزه استفاده نمود. برپایه تحقیق مذکور، حریم‌های حفاظتی ترسیم شده به روش مدل المان تحلیلی کوچکتر و دقیق‌تر (به دلیل در نظر گرفتن شرایط مرزی جریان) از حریم‌های حفاظتی ترسیم شده به دو روش دیگر بوده لذا کنترل و مدیریت منابع آلاینده یا دارای پتانسیل آلایندگی در داخل آن

راحت‌تر از حریم‌های دیگر می‌باشد. 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 نمود. وی به این نتیجه رسید که حریم‌های حفاظتی ترسیم شده توسط روشهای شعاع ثابت محاسبه‌ای، تایس و اشکال متغیر ساده شده به مراتب بزرگتر از حریم‌های ترسیمی توسط مدل تحلیلی WHPA بوده لذا در صورت کافی بودن اطلاعات، استفاده از حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط مدل‌های تحلیلی اقتصادی‌تر است.

نکته‌ای که در تحقیقات فوق‌الذکر نادیده گرفته شده است، تأثیر زمان حرکت یا فاصله از چاه در میزان انطباق حریم‌های حفاظتی ترسیم شده توسط روشهای مختلف با حریم ترسیمی به وسیله مدل عددی است. در تحقیق حاضر ضمن تعیین حریم حفاظتی تعداد ۹ حلقه از چاه‌های شرب شهر همدان توسط روش استاندارد و پذیرفته شده مدل عددی، میزان انطباق حریم‌های حفاظتی ترسیم شده توسط روش شعاع ثابت محاسبه‌ای (CFR) و دو روش تحلیلی KLF و Wyssling با حریم ترسیم شده توسط مدل عددی در زمان حرکت‌های ۵۰ روز، ۱، ۵ و ۱۰ سال (افزایش فاصله از چاه) نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در واقع هدف اصلی این تحقیق این مطلب است که در کدام یک از زمان‌های حرکت یا در چه فواصلی از چاه، امکان ترسیم حریم حفاظتی با استفاده از روشهای ساده تر، کم هزینه‌تر و با پیچیدگی کمتر از مدل عددی نیز وجود دارد؛ به‌طوریکه نتایج حاصل دارای بیشترین انطباق با نتایج به دست آمده از مدل عددی باشد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- روش شعاع ثابت محاسبه‌ای

روش شعاع ثابت محاسبه‌ای (CFR) روش نسبتاً ساده‌ای است که برای بسیاری از منابع آب (مثل چاه ، چشمه یا قنات) قابل استفاده می‌باشد. این روش ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین روش جهت تعیین حریم حفاظتی چاه بوده و معمولاً برای تعریف یک حریم اولیه و ابتدایی قبل از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز برای استفاده از یک روش پیچیده‌تر و مناسب‌تر بکار می‌رود. در این روش دایره‌ای در اطراف چاه(به مرکزیت چاه) ترسیم 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 حال پمپاژ را در یک دوره زمانی معین، تأمین می‌کند. اگر بخشی از آبخوان را که تحت تأثیر چاه در حال پمپاژ قرار دارد به صورت یک استوانه در نظر بگیریم رابطه نهایی جهت محاسبه شعاع استوانه به شکل زیر خواهد بود (U.S. EPA, 1987):

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

در این رابطه r شعاع استوانه (متر)، Q میزان پمپاژ (متر مکعب بر روز)، H طول اسکرین یا بخش مشبک چاه (برحسب متر، برای چاه‌های ناقص ضخامت اشباع آبخوان در محل چاه مورد استفاده قرار می‌گیرد)، n تخلخل مواد آبخوان (بدون بعد) و t زمان حرکت (روز) می‌باشد. همانطوری‌که در رابطه (۱) قابل مشاهده است تنها پارامترهای هیدروژئولوژیکی مورد استفاده در این روش تخلخل و ضخامت اشباع آبخوان می‌باشند. در این روش آبخوان همگن و همسانگرد (ایزوتروپ) و گرادیان هیدرولیکی ناچیز در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل حریم ترسیم شده توسط این روش به شکل دایره خواهد بود. در واقعیت آب زیرزمینی از مناطق مرتفع به سمت مناطق کم ارتفاع و هموار در جریان می‌باشد. در نتیجه گرادیان هیدرولیکی افقی در طبیعت نادر است.

۲-۲- روش‌های تحلیلی

در این روشها از یک‌سری معادلات تحلیلی، بر پایه اطلاعات هیدروژئولوژیک، برای محاسبه نواحی تسخیر یا حریم حفاظتی چاه استفاده می‌گردد. اصول کلی در این روش‌ها محاسبه فواصل بالادست، پائین‌دست و جانبی حریم حفاظتی یک چاه به کمک معادلات تجربی می‌باشد. در این روش‌ها اطلاعات بیشتری در مقایسه با روش‌های شعاع ثابت مورد نیاز می‌باشد. همچنین امکان استفاده از خطوط تقسیم هیدروژئولوژیکی و مرزهای آبخوان نیز وجود دارد. ضمن اینکه روش‌های تحلیلی برای آبخوان‌های با سطح ایستایی هموار یا شیب‌دار قابل استفاده می‌باشند. علیرغم در نظر گرفتن اکثر پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان و جریان آب زیرزمینی، اشکال اصلی این روشها، درنظر گرفتن یک‌سری فرضیات و ساده انگاریهایی است که با شرایط واقعی آبخوان متفاوت می‌باشد. به‌طور مثال در اکثر روشهای تحلیلی، خواص هیدرولیکی آبخوان همگن و همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. روش‌های تحلیلی مختلفی تاکنون توسط مراکز تحقیقاتی دنیا ارائه شده است که در این تحقیق از دو روش متداول به نام‌های Wyssling و KLF استفاده شده است.

۲-۲-۱- روش Wyssling

روش Wyssling یکی از روش‌های آلمانی جهت تعیین حریم

حفاظتی چاه بوده که توسط شخصی به همین نام در سال ۱۹۷۹ ارائه گردید. این روش یک روش تحلیلی ساده برای آبخوان‌های همگن و متخلخل می‌باشد. روش مذکور برای یک چاه در حال پمپاژ و گرادیان هیدرولیکی شیب‌دار که باعث ایجاد مخروط افت متقارن می‌گردد، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Puchalski, 2009). روابط مورد استفاده در این روش به صورت زیر می‌باشند:

$$Q = kBbi \quad (۲)$$

$$B = \frac{Q}{kbi} \quad (۳)$$

$$B' = \frac{B}{2} \quad (۴)$$

$$V = \frac{ki}{n} \quad (۵)$$

$$L = V.t \quad (۶)$$

$$X_o = \frac{Q}{(2\pi kbi)} \quad (۷)$$

$$S_o = \frac{\left[+ L + (L(L + 8X_0))^{\frac{1}{2}} \right]}{2} \quad (۸)$$

$$S_u = \frac{\left[- L + (L(L + 8X_0))^{\frac{1}{2}} \right]}{2} \quad (۹)$$

در روابط فوق k هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، i گرادیان هیدرولیکی (بدون بعد)، n تخلخل موثر (بدون بعد)، b ضخامت آبخوان (متر)، t زمان حرکت (روز)، B حداکثر عرض ناحیه تسخیر (متر)، B' حداکثر عرض حریم حفاظتی (متر)، V سرعت مؤثر (متر بر روز)، L پارامتر بدون بعد، X_o فاصله پائین دست چاه تا منطقه تسخیر، S_o فاصله حفاظتی بالا دست چاه (متر) و S_u فاصله حفاظتی پائین دست چاه (متر) می‌باشند. در این روش برخلاف روش شعاع ثابت، علاوه بر تخلخل و ضخامت اشباع، از گرادیان هیدرولیکی جریان آب زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی مواد تشکیل دهنده آبخوان نیز استفاده می‌شود.

۲-۲-۲- روش KLF

در سال ۲۰۰۱ متخصصین آب زیرزمینی در کشور پرتقال یک سری معادلات تجربی برای محاسبه ابعاد ناحیه تسخیر (حریم حفاظتی) چاه ارائه دادند. به کمک روش ارائه شده می‌توان حریم‌های حفاظتی با ابعاد مختلف را به راحتی و با سرعت بالا تهیه کرد. این روش معمولاً برای آبخوان‌های آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد (Moinante and Lobo-ferreira, 2005). بر طبق این روش حریم حفاظتی دارای شکلی بیضوی بوده که با کاهش گرادیان هیدورلیکی، به شکل دایره نزدیکتر می‌گردد. در این روش از سه رابطه برای محاسبه فواصل حفاظتی بشرح زیر استفاده می‌گردد:

$$r_{max} = \frac{(0.00002x^5 - 0.00009x^4 + 0.015x^3 + 0.37x^2 + x)}{F} \quad (۱۰)$$

$$r_{min} = \frac{(-0.042x^3 + 0.37x^2 - 1.04x)}{F} \quad (۱۱)$$

$$r_p = 4\sqrt{\frac{Q}{nb}} \quad (۱۲)$$

$$F = \frac{(2\pi kbi)}{Q} \quad (۱۳)$$

$$x = 2ki\left[\frac{\pi bt}{Qn}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۱۴)$$

در روابط فوق Q میزان پمپاژ (مترمکعب بر روز)، k هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، i گرادیان هیدرولیکی (بدون بعد)، b ضخامت آبخوان (متر)، n تخلخل موثر (بدون بعد)، t زمان حرکت (روز)، F و x پارامتر بدون بعد، r_{max} فاصله بالادست حریم حفاظتی (متر)، r_{min} فاصله پائین دست حریم حفاظتی (متر) و r_p عرض حریم حفاظتی عمود بر جهت جریان (متر) می‌باشند.

محدودیت‌های استفاده از این روابط :

الف- در صورتیکه مقدار x بزرگتر از ۱۸ شود، نبایداز رابطه ۱۰ استفاده کرد.

ب- اگر x کوچکتر از ۳/۵- شود به جای r_{min} یک فاصله حفاظتی حداقل ۲۵ متر استفاده گردد، همچنین اگر مقدار تخلخل کمتر از ۱۰ درصد باشد نباید از رابطه ۱۱ استفاده گردد.

ج- اگر r_{max} بیش از ۴ برابر r_{min} باشد خطای محاسباتی بیش از ۱۵ درصد خواهد بود. این خطا بیشتر در ارتباط با عدم قطعیت داده‌های ورودی است. از آنجائیکه این خطا تنها باعث ترسیم حریم حفاظتی بیش از اندازه مورد نیاز می‌گردد، لذا نباید یک محدودیت جدی در نظر گرفته شود. در این روش نیز همانند روش وایسلینگ از تخلخل، ضخامت اشباع، گرادیان هیدرولیکی و هدایت هیدرولیکی مواد تشکیل دهنده آبخوان استفاده می‌شود.

۲-۳- مدل عددی

امروزه مدل عددی به عنوان یک روش استاندارد و متداول جهت ترسیم مناطق تسخیر (حریم حفاظتی) چاه در بسیاری از نقاط دنیا

مورد استفاده قرار می‌گیرد (Golder, 2001, Frind, 2002, Miller, 2003, Shuguang and Huasheng, 2012). در این مدلها معادله اصلی جریان آب زیرزمینی از طریق روشهای تقریب‌زنی[17] به شکلی در می‌آید که به راحتی و به سرعت 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[18]، معادلات جریان محاسبه شده و مقادیر متغیر مجهول (بار هیدرولیکی) برای هر گره بدست 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 نواحی تسخیر یا حریم‌های حفاظتی چاه ترسیم می‌گردد. از ویژگیهای مدل‌های عددی، قابل استفاده بودن برای تمامی وضعیت‌های هیدروژئولوژیکی می‌باشد. به‌طوری‌که این مدل‌ها توانایی شبیه‌سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی، مرزهای جریان پیچیده و غیر خطی، چاه‌های ناقص، آبخوان‌های چند لایه، ناهمگن و ناهمساگرد را دارا می‌باشند. لذا مدل عددی مطمئن‌ترین روش جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه محسوب می‌شود (Theodossiou and Latinopoulos, 2009). مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق مدل GMS (نسخه ۶/۵) بوده که یک مدل جریان و انتقال سه بعدی است. این مدل دارای یک برنامه شبیه‌سازی جریان به روش تفاضل محدود[19] به نام MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1987) و یک برنامه مکان‌یابی ذره‌ای[20] به نام MODPATH (Pollock, 1989) 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 دشت بهار که چاه‌های مورد مطالعه در داخل آن حفر شده‌اند، از منابع مختلف جمع‌آوری، 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 گردید. سپس از طریق 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 دشت بهار واسنجی گردید. سپس نتایج مدل واسنجی شده به همراه تخلخل موثر مواد تشکیل دهنده آبخوان به عنوان داده اولیه وارد برنامه MODPATH شده و مسیرهای جریان آب زیرزمینی محاسبه و نهایتاً مناطق تسخیر چاه‌های شرب شهر همدان با زمان سیر ۵۰ روز، ۱، 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 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) را مشخص کرد که 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.

۲-۴- مشخصات چاه‌های مورد مطالعه

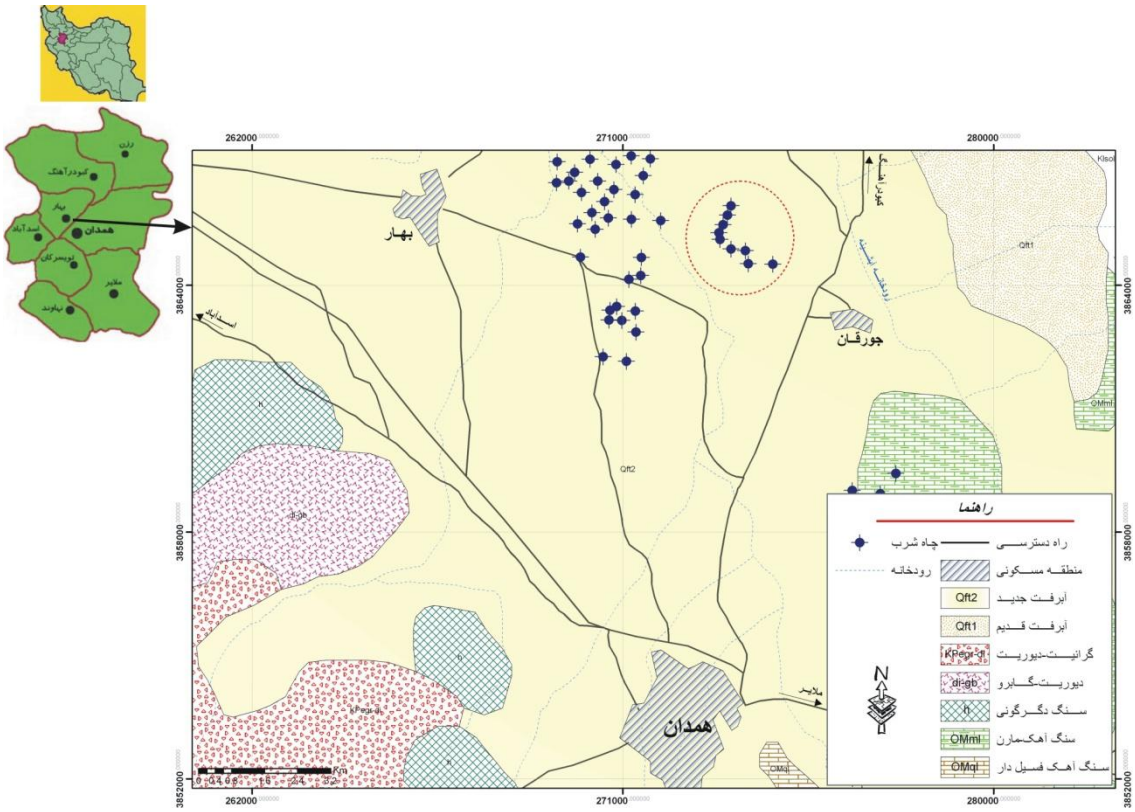
به منظور مقایسه روش‌های ترسیم حریم حفاظتی از داده‌های ۹ حلقه چاه شرب شهر همدان استفاده شده است. چاه‌های مذکور که به نام گروه شاهد ۷ نامیده می‌شوند در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال شهر همدان و حدفاصل روستاهای جورقان و امزاجرد واقع شده‌اند در شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. تمامی چاه‌های مورد مطالعه در داخل آبخوان آبرفتی دشت بهار همدان و تا سنگ کف شیستی حفر شده‌اند. از نظر زمین شناسی، رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان عمدتاً از شن، ماسه و به مقدار کمتر سیلت و رس تشکیل شده است (دلخواهی و اسدیان، ۱۳۹۰).

در جدول ۱ مشخصات کلی چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. براساس جدول ۱ عمق چاه‌ها بین ۶۰ تا ۹۰ متر و عمق برخورد به آب زیرزمینی بین ۱۹/۰۷ الی ۲۷/۶۷ متر می‌باشد. آبدهی متوسط چاه‌های مورد مطالعه در محدوده ۱۴۴/۳۹ الی ۸۶۶/۳۷ متر مکعب بر روز در تغییر است. ضخامت اشباع متوسط آبخوان نیز ۵۳ متر می‌باشد. از نظر هیدروژئولوژیکی، جهت غالب جریان آب زیرزمینی در محدوده چاه‌های مورد مطالعه، از جنوب شرق به سمت شمال غرب و گرادیان هیدرولیکی آبخوان بین ۵/۵ تا ۶/۸ در هزار

می‌باشد. در جدول ۲ نیز پارامترهای هیدرولیکی آبخوان در محل چاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. براین اساس، هدایت هیدرولیکی و ضریب قابلیت انتقال متوسط آبخوان نیز به ترتیب برابر ۱۵ متر بر روز و ۷۷۸ متر مربع بر روز می‌باشد. تخلخل موثر نیز بطور متوسط ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است. به منظور تعیین حریم حفاظتی چاه‌های شرب مورد مطالعه از روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، دو روش تحلیلی و مدل عددی استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

به منظور ترسیم حریم حفاظتی ۹ حلقه چاه شرب شهر همدان در محیط نرم افزار GMS از نتایج مدل واسنجی شده جریان آب زیرزمینی در آبخوان دشت بهار که برای سال آبی ۸۶- ۱۳۸۵ تهیه شده بود استفاده گردید (دلخواهی و همکاران، ۱۳۸۷).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات چاه‌های شرب شهر همدان (گروه شاهد هفت)

شماره چاه	X (UTM)	Y (UTM)	عمق چاه (متر)	سال حفر	آبدهی (متر مکعب بر روز)	عمق آب (متر)	عمق سنگ کف (متر)	ضخامت اشباع آبخوان (متر)
۲۷۰۱	۲۷۴۰۴۶	۳۸۶۴۵۲۰	۷۵	۱۳۶۶	۵۴۱.۴۸	۱۹.۸۳	۷۳.۴۴	۵۳.۶۱
۲۷۰۲	۲۷۳۹۷۳	۳۸۶۴۸۴۰	۷۵	۱۳۶۹	۲۰۲.۱۵	۲۱.۳	۷۴.۱۱	۵۲.۸۱
۲۷۰۳	۲۷۳۳۵۶	۳۸۶۵۱۱۰	۶۵	۱۳۷۲	۳۱۷.۶۷	۲۳.۳	۷۷.۸۶	۵۴.۵۶
۲۷۰۴	۲۷۳۳۳۱	۳۸۶۵۲۷۰	۶۰	۱۳۷۲	۳۱۷.۶۷	۲۴.۷۴	۷۷.۷۳	۵۲.۹۹
۲۷۰۵	۲۷۳۴۳۶	۳۸۶۵۴۷۰	۸۴	۱۳۶۵	۲۸۸.۷۹	۲۵.۷۴	۷۸.۲۴	۵۲.۵
۲۷۰۶	۲۷۳۵۴۰	۳۸۶۵۷۰۰	۶۰	۱۳۶۹	۱۴۴.۳۹	۲۴.۳۶	۷۵.۸	۵۱.۴۴
۲۷۰۷	۲۷۳۶۲۸	۳۸۶۵۹۳۰	۷۵	۱۳۶۵	۷۳۶.۴۱	۲۷.۶۷	۷۶.۸۶	۴۹.۱۹
۲۷۰۸	۲۷۳۶۲۸	۳۸۶۴۸۸۰	۷۰	۱۳۶۵	۵۴۱.۴۸	۲۱.۵۸	۷۶.۶	۵۵.۰۲
۲۷۰۹	۲۷۴۶۳۸	۳۸۶۴۵۰۹	۹۰	۱۳۸۱	۸۶۶.۳۷	۱۹.۰۷	۷۱.۰۲	۵۱.۹۵

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی آبخوان در محل چاه‌های شرب شهر همدان

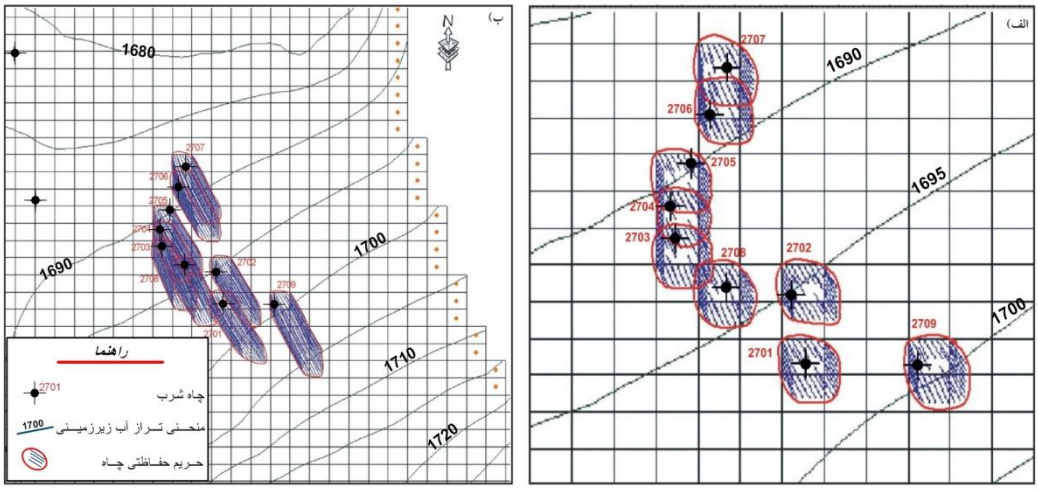
شماره چاه	گرادیان هیدرولیکی	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)	ضریب قابلیت انتقال (متر مربع بر روز)
۲۷۰۱	۰.۰۰۶۶	۱۵	۸۰۴.۱۵
۲۷۰۲	۰.۰۰۶۳	۱۵	۷۹۲.۱۵
۲۷۰۳	۰.۰۰۶۳	۱۴	۷۶۳.۸۴
۲۷۰۴	۰.۰۰۶۳	۱۴	۷۴۱.۸۶
۲۷۰۵	۰.۰۰۵۷	۱۵	۷۸۷.۵
۲۷۰۶	۰.۰۰۵۷	۱۵	۷۷۱.۶
۲۷۰۷	۰.۰۰۵۵	۱۵	۷۳۷.۸۵
۲۷۰۸	۰.۰۰۶۵	۱۵	۸۲۵.۳
۲۷۰۹	۰.۰۰۶۸	۱۵	۷۷۹.۲۵

در جدول ۳ نتایج محاسبات حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه توسط دو روش مدل عددی و شعاع ثابت محاسبه ای ارائه شده است. بر این اساس در روش مدل عددی، فاصله بالادست متوسط حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکتهای ۵۰ روز، ۱، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۲، ۱۲۸، ۶۳۳ و ۱۳۲۷ متر محاسبه گردیده است. در روش شعاع ثابت محاسبه‌ای نیز، شعاع متوسط حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکتهای ۵۰ روز، یک، پنج و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۰، ۵۵، ۱۲۳ و ۱۷۴ متر محاسبه گردید.

در شکل ۲ نیز حریم‌های حفاظتی ترسیم شده توسط مدل عددی برای زمان حرکت‌های یک و پنج سال نشان داده شده است. در حالت طبیعی حریم حفاظتی (منطقه تسخیر) به سمت بالادست جریان (در خلاف جهت جریان آب زیرزمینی) گسترش می‌یابد. با افزایش زمان حرکت (افزایش فاصله از چاه) فاصله بالادست حریم در مقایسه با فاصله پائین‌دست آن افزایش یافته که این مسئله سبب کشیدگی و بزرگ شدن حریم حفاظتی به سمت بالادست جریان آب زیرزمینی می‌گردد. براین اساس در حریم‌های حفاظتی یک ساله فواصل بالا دست و پائین دست حریم‌ها تقریباً با هم برابر بوده که این مسئله باعث دایره‌ای شدن حریم‌های حفاظتی شده است. در حالیکه حریم‌های حفاظتی پنج ساله به دلیل افزایش طول بخش بالادست در مقایسه با بخش پائین دست، دارای اندازه بزرگتر و شکل بیضی کشیده می‌باشند.

جدول ۳- شعاع حریم حفاظتی شعاع ثابت محاسبه ای و مدل عددی (برحسب متر)

شماره چاه	شعاع ثابت محاسبه ای				مدل عددی			
	پنجاه روز	یک سال	پنج سال	ده سال	پنجاه روز	یک سال	پنج سال	ده سال
۲۷۰۱	۲۳	۶۳	۱۴۰	۱۹۸	۲۴	۱۳۲	۶۷۵	۱۵۷۹
۲۷۰۲	۱۴	۳۹	۸۶	۱۲۲	۱۶	۱۲۲	۶۲۳	۱۳۹۲
۲۷۰۳	۱۸	۴۸	۱۰۶	۱۵۰	۱۹	۱۱۸	۵۹۰	۱۱۶۶
۲۷۰۴	۱۸	۴۸	۱۰۸	۱۵۲	۱۶	۱۲۱	۵۹۵	۱۱۹۰
۲۷۰۵	۱۷	۴۶	۱۰۳	۱۴۶	۲۰	۱۲۰	۵۹۵	۱۱۸۵
۲۷۰۶	۱۲	۳۳	۷۴	۱۰۴	۱۶	۱۳۰	۶۲۳	۱۲۱۴
۲۷۰۷	۲۸	۷۶	۱۷۰	۲۴۱	۳۳	۱۳۰	۶۲۸	۱۲۲۳
۲۷۰۸	۲۳	۶۲	۱۳۸	۱۹۵	۲۵	۱۲۷	۵۸۵	۱۲۲۸
۲۷۰۹	۳۰	۸۰	۱۸۰	۲۵۴	۳۱	۱۵۳	۷۸۵	۱۷۷۰



شکل ۲- حریم حفاظتی مدل عددی برای زمان حرکت‌های الف) یک سال و ب) پنج سال

مقایسه حریم‌های ۱ و ۵ ساله چاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که فاصله بالادست در حریم‌های حفاظتی ۵ ساله، بطور متوسط ۴ برابر شده است. در حالیکه فاصله پائین دست حریم چاه‌های مذکور تغییر چندانی نکرده است. لذا به منظور مقایسه روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای و تحلیلی با مدل عددی از فاصله بالادست حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه استفاده گردید. براساس جدول ۳، میزان اختلاف شعاع حریم‌های ترسیمی توسط دو روش مدل عددی و شعاع ثابت محاسبه‌ای، برای زمان حرکتهای ۵۰ روز، ۱، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲، ۷۳، ۵۱۰ و ۱۱۵۴ متر می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از چاه، از میزان انطباق حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط روش شعاع ثابت محاسبه ای با مدل عددی کاسته می‌شود. در جداول ۴ و ۵ فواصل حفاظتی شعاع ثابت، تحلیلی و مدل عددی برای زمان حرکت‌های ۱ و ۵ سال ارائه شده است. براساس جداول مذکور شعاع حفاظتی محاسبه شده توسط روش شعاع ثابت محاسبه‌ای از فواصل بالادست محاسبه شده توسط مدل عددی و روشهای تحلیلی کوچکتر و از مقادیر فاصله پائین دست آنها بزرگتر می‌باشند.

به عبارت دیگر حریم ترسیمی توسط روش شعاع ثابت بخش قابل ملاحظه‌ای از ناحیه تسخیر و حریم واقعی در بخش بالادست چاه را در بر نمی‌گیرد درحالیکه بخش‌های غیر ضروری و بی تأثیر در بخش پائین دست چاه را که جزء حریم حفاظتی واقعی چاه محسوب نمی‌شوند را شامل می‌شود.

جدول ۴- فواصل حفاظتی شعاع ثابت، تحلیلی و مدل عددی برای زمان حرکت یک سال (بر حسب متر)

شماره چاه	*حریم حفاظتی ۱ سال*					
	CFR	wyssling		KLF		مدل عددی
		حریم حفاظتی بالادست	حریم حفاظتی پائین دست	حریم حفاظتی بالادست	حریم حفاظتی پائین دست	حریم حفاظتی بالادست
۲۷۰۱	۶۲.۵۶	۱۴۷.۰۶	۲۶.۶۱	۱۶۵.۳۸	۱۴.۸۹	۱۳۱.۵۸
۲۷۰۲	۳۸.۵۱	۱۲۶.۶۸	۱۱.۷۱	۱۴۴.۴۳	۱۲.۶۴	۱۲۲.۳۴
۲۷۰۳	۴۷.۵۰	۱۲۵.۳۱	۱۸.۰۰	۱۴۱.۵۸	۱۰.۷۲	۱۱۸.۰۴
۲۷۰۴	۴۸.۲۰	۱۲۵.۷۸	۱۸.۴۷	۱۳۴.۲۰	۱۰.۸۵	۱۲۰.۵۷
۲۷۰۵	۴۶.۱۷	۱۲۱.۵۶	۱۷.۵۳	۷۰.۱۱	۱۰.۴۱	۱۲۰.۲۹
۲۷۰۶	۳۲.۹۸	۱۱۳.۶۰	۹.۵۷	۱۲۹.۹۹	۱۲.۴۴	۱۳۰.۰۹
۲۷۰۷	۷۶.۱۶	۱۴۱.۴۰	۴۱.۰۲	۲۱۱.۵۸	۲۷.۱۶	۱۳۰.۱۲
۲۷۰۸	۶۱.۷۵	۱۴۴.۹۴	۲۶.۳۱	۱۶۳.۰۶	۱۴.۷۲	۱۲۶.۶۰
۲۷۰۹	۸۰.۳۹	۱۶۳.۶۰	۳۹.۵۰	۱۸۳.۸۸	۲۳.۹۵	۱۵۲.۵۲

جدول ۵- فواصل حفاظتی شعاع ثابت، تحلیلی و مدل عددی برای زمان حرکت پنج سال (بر حسب متر)

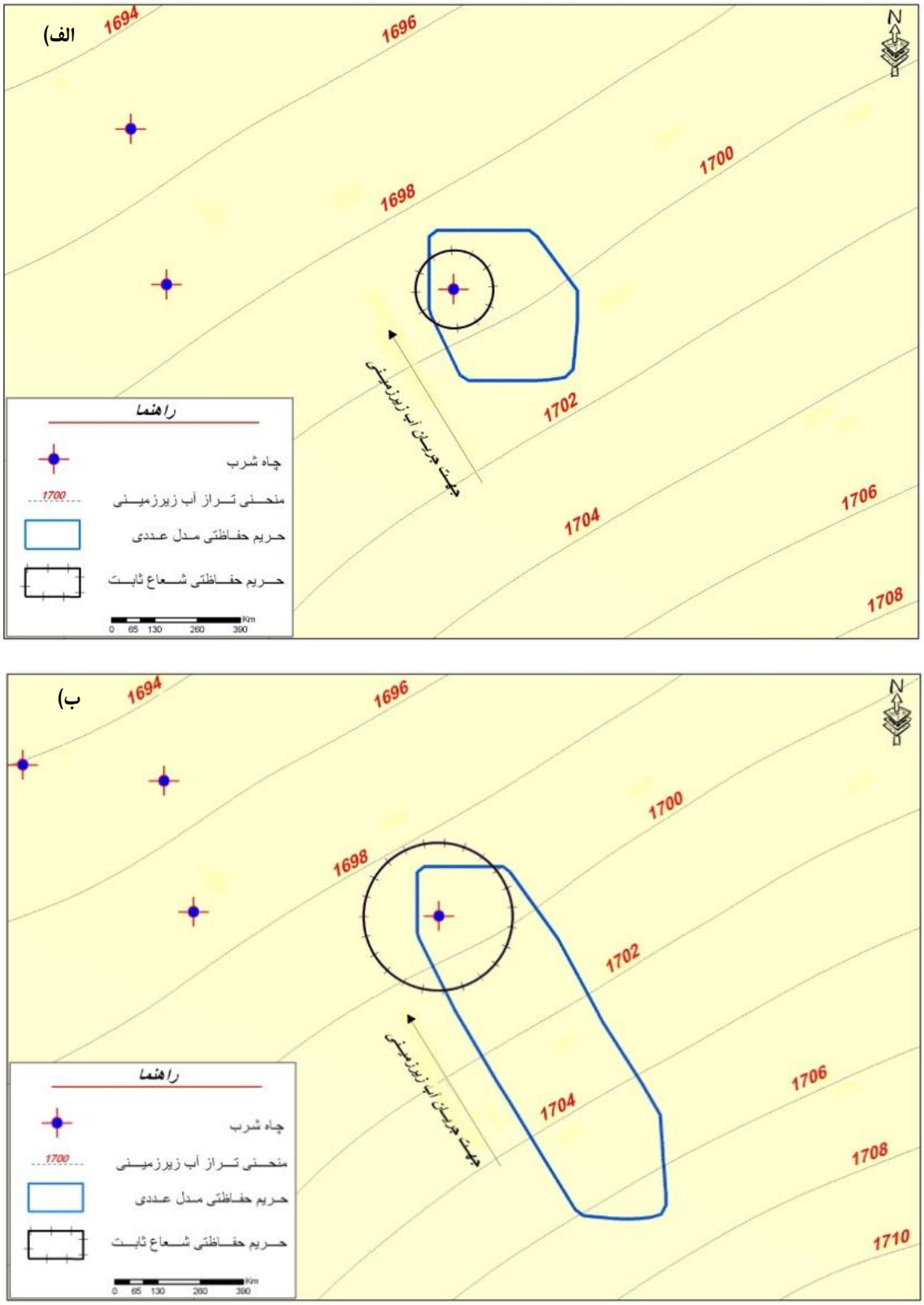
شماره چاه	*حریم حفاظتی پنج سال*					
	CFR	wyssling		KLF		مدل عددی
		حریم حفاظتی بالادست	حریم حفاظتی پائین دست	حریم حفاظتی بالادست	حریم حفاظتی پائین دست	حریم حفاظتی بالادست
۲۷۰۱	۱۳۹.۸۹	۶۳۳.۱۶	۳۰.۹۱	۷۴۷.۸۱	۱۳۵.۴۲	۶۷۵
۲۷۰۲	۸۶.۱۲	۵۸۷.۵۰	۱۲.۶۲	۵۸۴.۵۴	۳۰۸.۸۷	۶۲۲.۷۸
۲۷۰۳	۱۰۶.۲۱	۵۵۶.۸۱	۲۰.۲۶	۶۷۷.۸۵	۱۶۸.۷۹	۵۹۰.۳۹
۲۷۰۴	۱۰۷.۷۷	۵۵۷.۳۹	۲۰.۸۴	۶۴۰.۹۸	۱۶۳.۸۱	۵۹۵.۳۸
۲۷۰۵	۱۰۳.۲۳	۵۳۹.۸۷	۱۹.۷۴	۳۳۵.۵۴	۱۶۲.۷۳	۵۹۴.۸۳
۲۷۰۶	۷۳.۷۴	۵۳۰.۳۸	۱۰.۲۵	۷۱۸.۹۲	۳۰۸.۱۱	۶۲۳.۳۴
۲۷۰۷	۱۷۰.۳۰	۵۵۴.۲۱	۵۲.۳۳	۶۳۰.۷۷	۵۴.۲۰	۶۲۷.۸۷
۲۷۰۸	۱۳۸.۰۸	۶۲۳.۷۰	۳۰.۵۷	۷۳۷.۰۵	۱۳۲.۷۱	۵۸۴.۵۳
۲۷۰۹	۱۷۹.۷۵	۶۶۸.۸۱	۴۸.۳۱	۷۶۹.۳۹	۸۷.۶۲	۷۸۵.۱۴

به منظور درک بهتر مطلب در شکل ۳ حریم‌های حفاظتی ۱ و ۵ ساله ترسیم شده توسط روشهای شعاع ثابت و مدل عددی برای چاه شماره ۲۷۰۹ با یکدیگر مقایسه شده است.

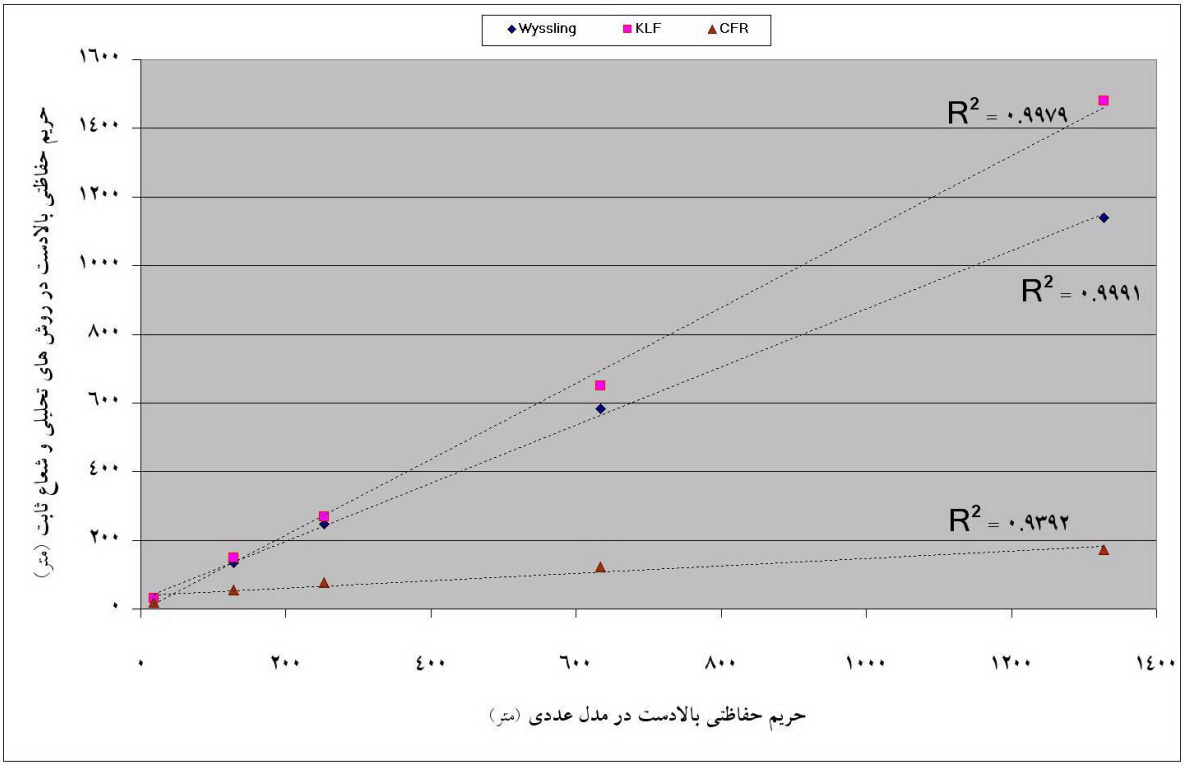
براساس شکل ۳ حریم‌های حفاظتی ترسیم شده به روش شعاع ثابت تنها ۲۱ درصد حریم حفاظتی یک و پنج ساله ترسیمی توسط مدل عددی را پوشش داده و بخش عمده‌ای از فضای بالادست حریم عددی را دربرنمی‌گیرند. بنابراین استفاده از روش شعاع ثابت محاسبه شده (CFR) برای یک آبخوان با گرادیان هیدرولیکی نسبتاً بالا سبب می‌شود تا حریم حفاظتی در بالا دست چاه کمتر از اندازه واقعی و در سمت پائین دست آن، بیش از نیاز طبیعی آن شود. این مسئله علاوه بر افزایش خطر ورود آلاینده‌ها از سمت بالا دست چاه، باعث صرف هزینه و وقت بیهوده جهت حفاظت مناطق پائین دستی که خطری برای چاه ندارند، می‌شود.

براساس روش تحلیلی Wyssling ، فاصله بالادست متوسط حریم حفاظتی ($S_\circ$) چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکتهای ۵۰ روز، ۱، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۵، ۱۳۴، ۵۸۴ و ۱۱۳۰ متر محاسبه شده است. فاصله پائین دست متوسط حریم حفاظتی (S_u) چاه‌های مورد مطالعه نیز برای زمان حرکتهای ۵۰ روز، ۱، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۱۸، ۲۳، ۲۷ و ۳۳ متر برآورد شده است. همچنین طبق روش تحلیلی KLF ، فاصله بالادست متوسط حریم حفاظتی (r_{max}) چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکتهای ۵۰ روز، ۱، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۹، ۱۴۹، ۶۴۹ و ۱۴۸۰ متر و فاصله پائین دست متوسط حریم حفاظتی (r_{min}) به ترتیب برابر با ۱۳، ۱۵، ۱۶۹ و ۲۰۲ متر محاسبه شده است. بر اساس جداول ۴ و ۵، فواصل بالادست حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط روشهای تحلیلی KLF و Wyssling تقریباً مشابه یکدیگر بوده و با تغییر زمان حرکت تغییر چندانی نمی‌کند (با افزایش زمان حرکت همبستگی حریم‌های بالادست کمی کاهش می‌یابد). مقایسه فواصل حفاظتی پائین دست با زمان حرکت یک سال (جدول ۴) بیانگر همبستگی نسبتاً مناسب روشهای تحلیلی KLF و Wyssling می‌باشد. ولی حریم‌های پائین دست پنج ساله در دو روش مذکور شباهتی به یکدیگر نداشته و از همبستگی آنها به شدت کاسته شده است (جدول ۵). در شکل ۴ حریم متوسط بالادست محاسبه شده توسط روش‌های تحلیلی و شعاع ثابت با روش مدل عددی مقایسه شده است.

در شکل ۵ نیز حریم حفاظتی چاه شماره ۲۷۰۹ ترسیم شده توسط روش KLF و Wyssling با حریم حفاظتی ترسیمی توسط مدل عددی برای زمان حرکت پنج سال مقایسه شده است. مقایسه دو روش تحلیلی مذکور با مدل عددی نشان می‌دهد که طول حریم بالادست و پائین دست محاسبه شده به روش KLF بزرگتر از مقادیر برآورد شده توسط روش Wyssling بوده و از تطابق بیشتری با حریم عددی برخوردار می‌باشد. در عوض، حریم جانبی محاسبه شده توسط روش Wyssling بزرگتر از مقادیر محاسبه شده توسط روش KLF می‌باشد. بطور کلی حریم‌های ترسیمی توسط هر دو روش تحلیلی علیرغم اینکه در مقایسه با روش شعاع ثابت، مساحت بیشتری از حریم حفاظتی مدل عددی را پوشش می‌دهند؛ ولی از نظر شکل ظاهری باریک و کشیده بوده و بخش قابل ملاحظه‌ای از فواصل جانبی حریم حفاظتی عددی را پوشش نمی‌دهند.



شکل ۳- مقایسه حریم حفاظتی شعاع ثابت و مدل عددی برای زمان حرکت‌های الف)۱ و ب)۵ سال



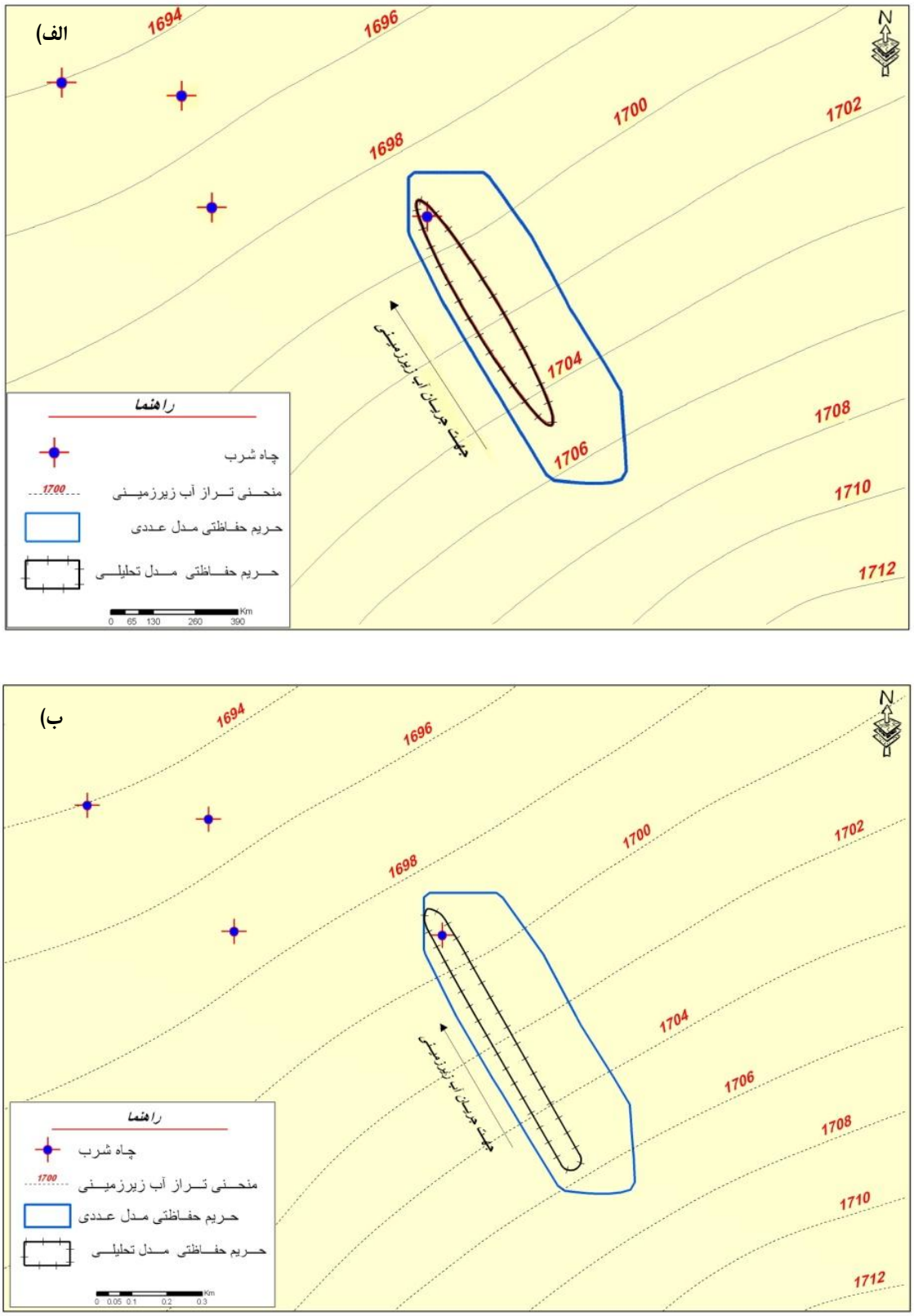
شکل ۴- مقایسه حریم حفاظتی بالادست در روش‌های تحلیلی، شعاع ثابت و مدل عددی

در شکل ۶ حریم‌های حفاظتی بالادست محاسبه شده توسط روشهای شعاع ثابت، تحلیلی و مدل عددی (مقادیر متوسط برای ۹ حلقه چاه مورد مطالعه) برای زمان حرکت‌های ۵۰ روز، یک، دو، پنج و ده سال با یکدیگر مقایسه شده است.

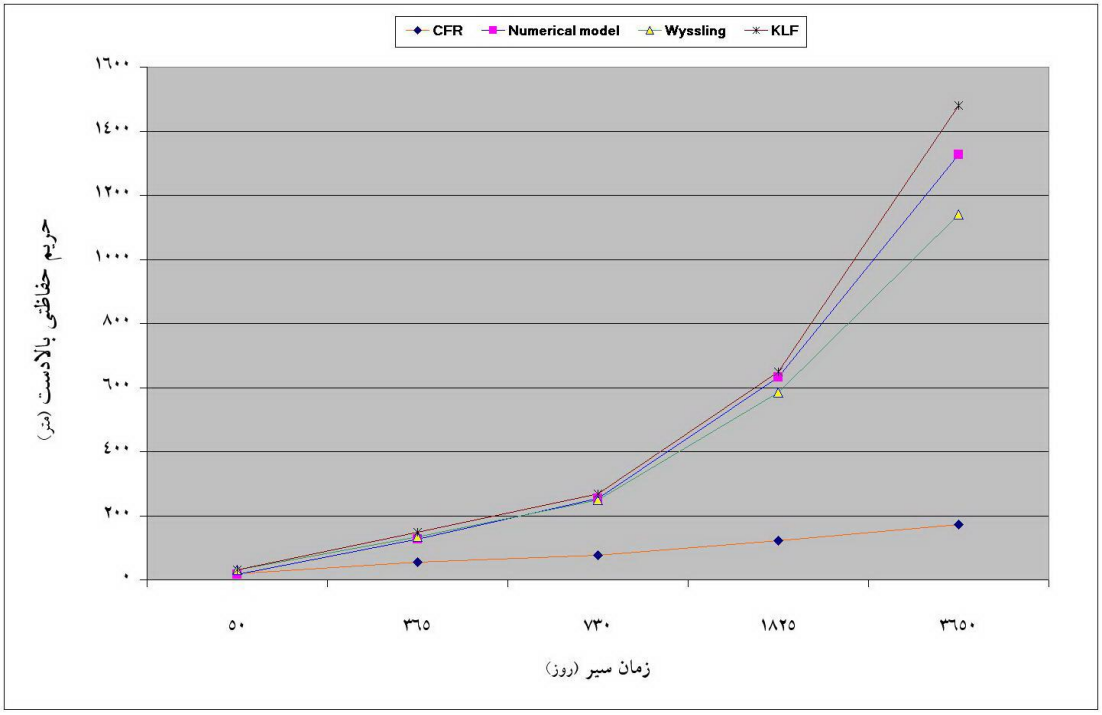
براین اساس، با افزایش زمان حرکت (افزایش فاصله از چاه) منحنی مربوط به روش شعاع ثابت از منحنی سایر روش‌ها به سرعت فاصله گرفته و در واقع از دقت فواصل بالادست محاسبه شده توسط این روش به شدت کاسته می‌شود. بطوریکه اختلاف حریم بالادست شعاع ثابت و مدل عددی با ازای زمان حرکت ۵۰ روز در حدود ۲ متر بوده که این مقدار در زمان حرکت ۱۰ سال به بیش از ۱۱۵۳ متر می‌رسد. به استثنا زمان حرکت ۵۰ روز، حریم‌های بالادست محاسبه شده به روش شعاع ثابت به مراتب کوچکتر از فواصل حفاظتی برآورد شده توسط روشهای تحلیلی و عددی می‌باشد.

لذا استفاده از روش شعاع ثابت محاسبه‌ای باعث می‌شود تا بخش‌های قابل توجهی از بالادست چاه که جزء حریم حفاظتی واقعی چاه محسوب می‌شود، نادیده گرفته شوند. در چنین وضعیتی، آلودگی چاه شرب توسط آلاینده‌های موجود در بخش‌های حفاظت نشده واقع در بالادست چاه دور از ذهن نخواهد بود. بر اساس تحقیقات انجام شده، اکثر باکتری‌ها و ویروس‌های بیماری‌زا حداکثر ۵۰ روز پس از ورود به داخل آبهای زیرزمینی می‌میرند. لذا استفاده از روش شعاع ثابت محاسبه‌ای جهت ترسیم حریم حفاظتی ۵۰ روزه چاه‌های شرب مناسب به نظر می‌رسد.

در داخل حریم حفاظتی ۵۰ روز، وجود هرگونه منابع پتانسیل آلودگی میکروبی یا انجام فعالیتهایی که منجر به آزادسازی و ورود میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا به منابع آب زیرزمینی شود ممنوع می‌باشد. با توجه به مراتب فوق الذکر استفاده از روش شعاع ثابت محاسبه ای تنها برای ترسیم حریم حفاظتی با زمان حرکت ۵۰ روز از دقت مناسب برخوردار بوده و استفاده از آن برای زمان حرکت‌های بالاتر پیشنهاد نمی‌گردد. براساس شکل ۶ روش‌های تحلیلی Wyssling و KLF در مقایسه با روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، از همبستگی و تطابق به مراتب بیشتری با روش مدل عددی برخوردار می‌باشند. با این حال همانند روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، با افزایش زمان حرکت از دقت روش‌های تحلیلی مذکور نیز کاسته می‌شود. مقایسه روش تحلیلی KLF با مدل عددی نشان می‌دهد که در تمامی زمانها، فاصله حفاظتی بالادست محاسبه شده توسط این روش بیشتر از مدل ریاضی عددی است. براین اساس اختلاف فواصل حفاظتی محاسبه شده تا زمان حرکت ۵ سال تغییر چنـــدانی نمی‌کند



شکل ۵- مقایسه حریم‌های تحلیلی الف)Wyssling و ب) KLF با مدل عددی برای زمان حرکت ۵ سال



شکل ۶- مقایسه تغییرات حریم حفاظتی بالادست نسبت به زمان حرکت.

به‌طوریکه مقدار این اختلاف از زمان حرکت ۵۰ روز تا ۵ سال تنها به میزان ۱/۵۴ متر افزایش می‌یابد.

ولی پس از آن با افزایش زمان سیر، اختلاف فواصل حفاظتی محاسبه شده توسط دو روش به سرعت افزایش یافته بطوریکه به ازای زمان حرکت ۱۰ سال میزان اختلاف فواصل حفاظتی مذکور به بیش از ۱۵۲ متر می‌رسد. لذا استفاده از روش تحلیلی KLF برای ترسیم حریم‌های حفاظتی با زمان حرکت بیشتر از ۵ سال بایستی با احتیاط صورت گیرد. براساس مراتب فوق‌الذکر حریم حفاظتی بالادست ترسیمی به روش تحلیلی KLF بزرگتر از حریم حفاظتی محاسبه شده به روش مدل عددی است. در نتیجه بخش‌هایی از بالادست چاه شرب که در داخل حریم حفاظتی چاه قرار ندارند، نیز جزء حریم حفاظتی چاه درنظر گرفته می‌شوند که این امر باعث صرف هزینه و وقت بیهوده جهت محافظت از مناطق بی تأثیر بر چاه می‌گردد. اما به هرحال حفاظت از نواحی بی تأثیر بر کیفیت آب چاه به مراتب بهتر از عدم حفاظت از مناطقی است که در داخل حریم حفاظتی واقعی چاه واقع شده و تأثیر مستقیم بر کیفیت آب چاه شرب دارند. در مورد روش تحلیلی Wyssling فواصل حفاظتی ترسیمی برای زمان حرکت‌های ۵۰ روز و یک سال بیشتر از مقادیر محاسبه شده به روش مدل عددی است. ولی در زمان حرکت‌های ۲ تا ۱۰ سال، فواصل حفاظتی بالادست محاسبه شده به روش Wyssling کمتر از فواصل مدل عددی می‌باشد. براین اساس اختلاف فواصل حفاظتی محاسبه شده توسط دو روش مذکور به ازای زمان حرکت ۲ سال در حدود ۵ متر بوده که این مقدار در زمان حرکت ۱۰ سال به حدود ۱۸۷ متر می‌رسد. لذا حریم‌های حفاظتی ترسیم شده به روش Wyssling برای زمان حرکت‌های بیش از یک سال، کوچکتر از حریم حفاظتی ترسیمی توسط مدل عددی بوده که این مسئله سبب نادیده گرفته شدن بخش‌هایی از حریم حفاظتی بالادست چاه شده که احتمال ورود آلاینده‌ها از طریق مناطق مذکور دور از ذهن نمی‌باشد. بنابراین استفاده از روش تحلیلی Wyssling برای ترسیم حریم‌های حفاظتی با زمان حرکت بیشتر از ۲ سال بایستی با احتیاط صورت گیرد. در مجموع مقایسه فواصل حفاظتی محاسبه شده توسط روش‌های تحلیلی فوق الذکر با مدل ریاضی عددی نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف فواصل حفاظتی محاسبه شده (به ازای زمان حرکت ۱۰ سال) برای روش‌های KLF و Wyssling به ترتیب برابر با ۱۵۳ و ۱۸۴ متر بوده که این مقادیر در مقایسه با حداکثر خطای روش شعاع ثابت محاسبه‌ای (۱۱۵۴ متر) ناچیز می‌باشد. تحقیق مشابه دیگری نیز که با استفاده از داده‌های ۸ حلقه از چاه‌های شرب منطقه یافت آباد شهر تهران انجام شده (توسط نویسنده مسئول)، نتایج فوق الذکر را تائید می‌نماید. لذا در صورت نبود بودجه، نیروی متخصص و زمان کافی و عدم دسترسی به اطلاعات جامع مورد نیاز در روش مدل عددی، به کمک روش‌های تحلیلی می‌توان حریم‌های

حفاظتی با درصد خطای به مراتب کمتر از روش‌های ساده‌تری مانند شعاع ثابت محاسبه‌ای، ترسیم نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور مقایسه چهار روش متداول جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه، شامل روش شعاع ثابت محاسبه ای، دو روش تحلیلی Wyssling و KLF و روش مدل عددی از داده‌های مربوط به ۹ حلقه از چاه‌های شرب شهر همدان استفاده گردید. براساس یافته‌های تحقیق انجام شده، حریم ترسیم شده توسط روش شعاع ثابت محاسبه‌ای (CFR)، به دلیل همگن و همسانگرد فرض کردن آبخوان و ناچیز در نظر گرفتن گرادیان هیدرولیکی، به شکل دایره می‌باشد. بنابراین حریم ترسیمی توسط این روش بخش قابل ملاحظه‌ای از ناحیه تسخیر و حریم واقعی در بخش بالادست چاه را در بر نمی‌گیرد. درحالیکه بخش‌های غیر ضروری و بی تأثیر در بخش پائین دست چاه را که جزء حریم حفاظتی واقعی چاه محسوب نمی‌شوند را شامل می‌شود. حریم‌های ترسیمی توسط دو روش تحلیلی KLF و Wyssling نیز علیرغم اینکه در مقایسه با روش شعاع ثابت، مساحت بیشتری از حریم حفاظتی مدل عددی را پوشش می‌دهند؛ ولی از نظر شکل ظاهری باریک و کشیده بوده و بخش قابل ملاحظه‌ای از فواصل جانبی حریم حفاظتی عددی را پوشش نمی‌دهند. این نتایج با یافته‌های حاصل از تحقیق‌های مشابه قبلی مطابقت دارد (بخش مقدمه). اما نوآوری این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیق‌های مشابه انجام شده، بررسی تأثیر تغییر زمان حرکت یا افزایش و کاهش فاصله از چاه بر روی حریم حفاظتی ترسیم شده توسط چهار روش فوق الذکر می‌باشد. براین اساس با افزایش زمان حرکت (افزایش فاصله از چاه)، از دقت و تطابق روش‌های شعاع ثابت و تحلیلی نسبت به مدل عددی کاسته می‌شود. طبق نتایج به دست آمده، روش شعاع ثابت محاسبه‌ای صرفاً برای ترسیم حریم‌های حفاظتی چاه با زمان حرکت ۵۰ روز از دقت کافی برخوردار بوده و استفاده از آن برای ترسیم حریم‌های با زمان حرکت بالاتر توصیه نمی‌گردد. همچنین استفاده از روش‌های تحلیلی KLF و Wyssling برای ترسیم حریم‌های حفاظتی با زمان حرکت به ترتیب بیشتر از ۵ و ۲ سال بایستی با احتیاط صورت گیرد. به منظور صحت‌سنجی یافته‌های این تحقیق، تحقیق مشابه دیگری نیز با استفاده از داده‌های هشت حلقه از چاه‌های شرب تهران (منطقه یافت آباد) انجام گردید. نتایج نشان داد که علیرغم تغییر محل مورد مطالعه و در نتیجه تغییر پارامترهای مورد استفاده در چهار روش فوق الذکر، نتایج هر دو تحقیق کاملاً مشابه یکدیگر است. بطور کلی طبق نتایج بدست آمده، روش مدل عددی مناسب‌ترین روش جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه به حساب می‌آید. با این وجود، در مقایسه با سایر روشها، این روش نیازمند تخصص و تجربه بالاتر و صرف زمان و هزینه بیشتری بوده و استفاده از این روش فقط زمانی توصیه می‌شود که اطلاعات کافی و مورد نیاز در منطقه مورد نظر وجود داشته باشد. زمانیکه بخش عمده‌ای از داده‌های ورودی باید تخمین زده شود؛ مدل‌های تحلیلی نیز همان دقت مدلهای عددی را فراهم خواهند نمود.

پی‌نوشت‌ها

1 - Capture zone
2 - Time of travel
3 -Wellhead protection area: WHPA
4 - Arbitrary Fixed Radius: AFR
5 -Calculated Fixed Radius: CFR
6 - Simpliefied Variable Shapes: SVS
7 - Hydrogeologic Mapping: HM
8 - Analytical methods: AM
9 - Numerical Models: NM
10 - General Particle Tracking Module: GPTRAC
11 - Semi analytical model
12 - Capcure Zone Module: CAPZONE
13 - Modular Flow Model: MODFLOW
14 - Krijgsman & Lobo-Ferreira: KLF
15 - Analytic Element Model
16 - Approximating
17 - Iteration
18- Aquifer Simulation Model for Windows: ASMWIN
19 - Finite difference
20 - Particle tracking

۵- مراجع

بدو ک (۱۳۸۳) مبانی محاسبات حریم بهداشتی برای حفاظت کیفی چاه‌های آب شرب در شهرها. استقلال، سال ۲۳، شماره ۲: ۷۷-۹۱.

دلخواهی ب ، اسدیان ف (۱۳۹۰) مروری بر عوامل موثر بر حریم حفاظتی چاه‌های شرب با استفاده از مدل ریاضی عددی، مطالعه موردی: منطقه یافت آباد تهران. تحقیقات منابع آب ایران، سال ۷، شماره ۳: ۸۹-۹۴.

دلخواهی ب، خدایی ک و اسدیان ف (۱۳۸۷) تعیین حریم حفاظتی چاه‌های شرب شهر همدان با استفاده از مدل عددی و GIS. انتشارات شرکت آب و فاضلاب استان همدان، همدان، ۱۷۱ صفحه.

Bates JK , Evans JE (1996) Evaluation of wellhead protection area delineation methods, applied to the

Universidade do Minho, Guimaraes, Portugal, 21-34.

Pollock DW (1989) Ducumentation of computer programs to complete and display pathlines using results from the U.S. Geological survey modular three dimensional finite difference groundwater model, USGS open file report, 81.

Puchalski G (2009) Wellhead Protection Plan for the City of Barrett. J Minnesota Deppartment of Health 24(3): 2-16.

Shuguang L and Huasheng L (2012) Wellhead protection area delineation using available data, MSU College of Engineering, Michigan DEQ, USA, 67.

Springer AE and Bair ES (1992) Comparison of methods used to delineate capture zones of wells: Stratified-Drift Buried-Valley Aquifer. Ground Water Journal 30(6): 908-917.

Stroble RO and Robillard PD (2006) Comparison of several EPA-recommended US and German wellhead protection area delineation methods in agricultural settings. J Water SA 32(4): 507-517.

Theodossiou N and Latinopoulos D (2009) Economic aspects of the delineation of well head protection areas under conditions of uncertainty . In: Proceedings of the second International CEMEPE & SECOTOX Conference (CEMEPE & SECOTOX-2009), 10-11 October, Mykonos, Greek: 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, 354.

municipal well field at Elmore. Ottawa County, Ohio. Ohio Journal of Science 96(1): 13-22.

Bingham M (2010) Vulnerability Assessment and Scoring of Wellhead Protection Areas City of Hamilton. Earthfx Incorporated, Ontario, 53.

Frind EO and Mohammad DS (2002) Delineation of three-dimensional well capture zone for complex multi-aquifer systems. Ground Water Journal 40(6): 586-598.

Golder Associates Ltd (2001) Phase II Groundwater Protection Study, County of Oxford, Golder Press, Ontario, Canada, Technical Report.

Harter T (2002) Delineating Groundwater Sources and Protection Zones, California Department of Health Services, California, 220.

McDonald MG and Harbaugh AW (1987) A modular three dimensional finite difference groundwater flow model. Techniques of water resources investigations , 06-A1 , USGS, 576.

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(2):105-114.

Moinante MJ and Lobo-ferreira JP (2005) On wellhead protection assessment methods and a case-study application in Montemor-o-Novo,Portugal. In: The Fourth Inter-celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, 11-13 July,