

ارزیابی روش‌های تعیین حریم کیفی چاه‌های شرب با استفاده از مدل عددی (مطالعه موردی: دشت بیرجند)

محسن عزیزی^۱، علی شهیدی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹

چکیده

از بخش‌های مهم در سیاست حفاظت از منابع آب زیرزمینی به منظور جلوگیری از مخاطرات سلامتی و زیست محیطی، تعیین حریم حفاظتی چاه می‌باشد. در این تحقیق ضمن معرفی روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، تحلیلی KLF و Wyssling و مدل عددی به عنوان متداول‌ترین روش‌ها جهت تعیین حریم حفاظت کیفی چاه، به منظور مقایسه روش‌های مذکور از داده‌های ۶ حلقه چاه شرب روستایی دشت بیرجند استفاده گردید. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که حریم کیفی ترسیمی روش شعاع ثابت محاسبه‌ای بخش قابل ملاحظه‌ای از حریم کیفی ترسیم شده توسط مدل عددی در بخش بالادست چاه را در بر نمی‌گیرد. حریم کیفی ترسیمی روش‌های تحلیلی Wyssling و KLF در مقایسه با حریم کیفی مدل عددی از نظر شکل ظاهری باریک و کشیده بوده و بخش قابل ملاحظه‌ای از فواصل جانبی حریم مدل عددی را پوشش نمی‌دهند و حریم حفاظتی کیفی بالادست محاسبه شده همواره از حریم کیفی بالادست مدل عددی بیش‌تر می‌باشد. بهترین هم‌پوشانی حریم روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، تحلیلی Wyssling و KLF با حریم کیفی عددی به ترتیب با درصد کارآمدی ۶۷/۱۲٪، ۶۴/۳۵٪ و ۶۰/۰۳٪ برای زمان حرکت یک سال می‌باشد و با افزایش زمان حرکت از هم‌پوشانی آن‌ها با مدل عددی کاسته می‌شود. به طور کلی مدل عددی دقیق‌ترین روش جهت ترسیم حریم حفاظت کیفی چاه می‌باشد ولی در صورت عدم وجود داده، زمان، سرمایه و تخصص کافی استفاده از روش‌های ساده‌تری مانند شعاع ثابت و تحلیلی نیز از دقت قابل قبول برخوردار خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: حریم حفاظتی، دشت بیرجند، مدل عددی

مقدمه

بر کاربری اراضی، جلوگیری برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی، حفاظت از محدوده و حریم چاه‌ها، ضروری است. اما محدودیت‌هایی نیز وجود دارد؛ زیرا از دیدگاه اقتصادی - اجتماعی قابل قبول نیست که برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی، برداشت از کل محدوده آبخوان را برای کاربری‌های مختلف ممنوع کرد. بنابراین بسیار مقرون به صرفه و معقول خواهد بود که در تعیین و تعریف سطح کنترل لازم در حفاظت از کیفیت آب زیرزمینی به جای اعمال کنترل بر کاربری اراضی و میزان برداشت، از ظرفیت میرایی طبیعی آلاینده در منطقه غیراشباع استفاده شود، بنابراین به جای آن که استفاده از تمامی قسمت‌های آبخوان ممنوع شود، تنها توسعه کاربری برای مناطق حساس و مستعد آلودگی متوقف گردد (مجرد و همکاران، ۱۳۹۲).

از این رو لازم است حریم‌ها بر پایه آسیب‌پذیری آبخوان و شعاع حفاظتی منابع آب با توجه به میزان آلاینده‌ها، برای آبخوان تعیین گردد. در واقع این امر نشان می‌دهد چه فعالیت‌هایی و در کجا با خطر احتمال آلودگی آب زیرزمینی می‌تواند صورت بگیرد و چه فعالیت‌هایی باید متوقف گردد، در منابع علمی از این محدوده به ناحیه تسخیر،

بخشی از چرخه آب در طبیعت در زیر سطح زمین قرار می‌گیرد که منابع آب‌های زیرزمینی یکی از اجزا آن محسوب می‌شود. بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی توسط چاه، قنات یا چشمه صورت می‌گیرد. به طور معمول در اکثر مناطق جهان، از آب‌های زیرزمینی برای مصارف خانگی، کشاورزی و صنعت توسط پمپاژ از چاه می‌باشد. امروزه تخلیه آب‌های زیرزمینی و عدم جایگزین شدن آب این منابع، از بزرگ‌ترین مشکلات محسوب می‌شود. آشنایی با اصول اولیه حرکت آب و آلاینده‌ها در لایه‌های خاک در قالب مبانی هیدروژئولوژی و حرکت آلودگی خاک از ضروریات اولیه در تعیین حریم منطقه آبد چاه است (فتحیان و دهقان، ۱۳۹۰).

به منظور حفاظت آبخوان‌ها در مقابل آلودگی، اعمال محدودیت‌ها

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

(Email: ashahidi@birjand.ac.ir

*) نویسنده مسئول:

آن‌ها به این نتیجه رسیدند 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 (Bates and Evans., 1996).

وولو و همکاران، در تحقیقی به توصیف حریم کیفی چاه‌های موجود در بروکلین پارک در مینسوتای آمریکا پرداختند. این کار با شبیه‌سازی جریان پایدار در آبخوان فرانکونی-آیرونتون-گالسویل و سطح آب آبخوان صورت گرفت. آن‌ها با استفاده از تحلیل المان محدود و مقیاس محلی و منطقه‌ای به شبیه‌سازی چاه‌های شهر اقدام کردند و از مدل تحلیل المان تک لایه برای توسعه و کالیبره کردن استفاده کردند. در نهایت، در این تحقیق حریم کیفی به روش معکوس Tracking-Particle برای چاه‌های موجود تعیین شد (Wuolo et al., 1995). لیونگستون و همکاران مطالعه‌ای موردی، روش‌های مختلف توصیف حریم کیفی و ارزیابی آن‌ها را ارائه دادند و به این نتیجه رسیدند که مدل‌سازی سه‌بعدی می‌تواند خیلی دقیق‌تر از مدل‌سازی عددی دوبعدی و حتی مدل تحلیلی باشد (Livingstone et al., 1995).

میلر و همکاران در تحقیقی با استفاده از نرم‌افزار ArcMAP، حریم کیفی محاسبه شده توسط روش شعاع ثابت را با روش‌های پیچیده‌تر مقایسه کردند. آن‌ها پیشنهاد نمودند که در جاهایی که زمان، سرمایه و کادر فنی محدود است، روش شعاع ثابت محاسبه شده به عنوان نقطه شروع حفاظت از کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Miller et al., 2003).

هارتر در تحقیقی تاثیر گرادیان هیدرولیکی آبخوان بر روی شکل حریم‌های حفاظتی ترسیمی روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای و مدل عددی را بررسی نمود. بر اساس نتایج تحقیق مذکور، در گرادیان هیدرولیکی کم‌تر از ۰/۰۵ درصد، شکل حریم حفاظتی ترسیم شده به دو روش مدل عددی و شعاع ثابت محاسبه‌ای تقریباً دایره‌ای 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. بنابراین با افزایش گرادیان هیدرولیکی از میزان انطباق حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط دو روش مذکور کاسته می‌شود (Harter., 2002).

موننت و همکاران در تحقیقی با ترسیم حریم حفاظتی چاه‌های شرب دهکده‌ای در کشور پرتغال، دو مدل تحلیلی KLF^{10} و $Wysling$ را با مدل عددی $ASMWIN^{11}$ مقایسه نمودند. آن‌ها همچنین با استفاده از روش‌های گرافیکی و آماری به این نتیجه رسیدند که اندازه حریم حفاظتی با دو پارامتر تغذیه سطحی آبخوان و میزان برداشت از چاه رابطه مستقیم دارد. (Moinante and Lobo-

ناحیه مشارکت و ناحیه سرچاهی نام برده شده است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۴).

در شرایط طبیعی، ناحیه تسخیر به فاصله اندکی از پایین‌دست هیدرولیکی چاه شروع شده و به سمت بالادست جریان آب زیرزمینی و تا مرزهای هیدرولوژیکی توسعه می‌یابد. در کاربردهای عملی معمولاً قسمت بالادست ناحیه تسخیر را توسط معیار زمان حرکت محدود می‌کنند و در واقع، تنها بخشی از ناحیه تسخیر را که در آن ذرات آب یا آلاینده در طی زمانی مشخص به چاه خواهند رسید را، حریم حفاظتی چاه می‌گویند. اندازه و شکل حریم حفاظتی چاه به ویژگی‌های هیدرولیکی مواد تشکیل دهنده آبخوان، میزان برداشت از آبخوان، فاصله از منابع آبی مجاور، مرزها و جهت جریان آب زیرزمینی بستگی دارد (دلخواهی و اسدیان، ۱۳۹۰).

به منظور ترسیم حریم حفاظتی چاه‌های شرب از شش روش می‌توان استفاده کرد که به ترتیب افزایش هزینه، دقت و پیچیدگی شامل روش‌های شعاع ثابت اختیاری^۱ (AFR)، شعاع ثابت محاسبه‌ای^۲ (CFR)، اشکال متغیر ساده شده^۳ (SVS)، ترسیم نقشه هیدروژئولوژیکی^۴ (HM)، روش‌های تحلیلی^۵ (AM) و مدل‌های عددی^۶ (NM) می‌باشند (U.S EPA, 1987). از میان روش‌های مذکور، مدل 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 مناسب‌ترین روش جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه محسوب می‌شود.

برخی مطالعات صورت گرفته در خصوص روش‌های ترسیم حریم حفاظتی چاه به شرح زیر می‌باشند. اسپرینگر و بایر، سه مدل تحلیلی^۷ (CAPZONE^۷/GWPATH^۸)، نیمه تحلیلی^۹ (RESSQC/DREAM) و عددی^{۱۰} (MODFLOW) را با یکدیگر مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که منطقه تسخیر ترسیم شده توسط مدل‌های تحلیلی و نیمه تحلیلی به دلیل در نظر نگرفتن تغییرات مکانی ضریب قابلیت انتقال و تخلخل، به مراتب کوچک‌تر از منطقه تسخیر واقعی ترسیم شده توسط مدل عددی می‌باشد (Springer and Bair., 1992).

باتیس و اوانس مدل‌های تحلیلی^{۱۱} GPTRAC، نیمه تحلیلی CAPZONE و عددی MODFLOW را با یکدیگر مقایسه نمود.

- 1 -Arbitrary Fixed Radius
- 2 -Calculated Fixed Radius
- 3 -Simplified Variable Shapes
- 4 -Hydrogeologic Mapping
- 5 -Analytical methods
- 6 -Numerical Models
- 7 - Capture Zone Module
- 8 - Ground-Water Flow Path Analysis
- 9 - General Particle Tracking Module

10 - Krijgsman and Lobo-Ferreira

11 - Aquifer Simulation Model for Windows

ferreira., 2005).

استرویل و رویلارد نیز در تحقیقی دقت، هزینه و داده‌های مورد نیاز در روش‌های پیشنهادی توسط سازمان محیط زیست آمریکا و روش‌های تحلیلی آلمانی را با یکدیگر مقایسه نموده و به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش‌های آلمانی جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه‌های شرب شخصی، به دلیل سادگی و کم هزینه بودن این روش - ها مفید می‌باشد (Stroble and Robillard., 2006).

مقییر و تارازی از سه روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، تحلیلی KLF و مدل المان تحلیلی برای ترسیم حریم حفاظتی چاه‌های شرب شهر غزه استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که حریم‌های حفاظتی ترسیم شده به روش المان تحلیلی کوچک‌تر و دقیق‌تر از حریم‌های حفاظتی ترسیم شده به دو روش دیگر می‌باشد (Mogheir and Tarazi., 2010).

اکبرپور و همکاران با استفاده از نرم‌افزار WHAEM2000^۱ به مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی دشت بیرجند پرداختند. آن‌ها با محاسبه حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه به این نتیجه دست یافتند که میزان دبی بهره‌برداری و هدایت هیدرولیکی نقش بسزایی در اندازه و شعاع حفاظتی در محدوده شهر بیرجند داشته است، به طوری که بالا بودن دبی و هدایت هیدرولیکی در برخی چاه‌ها باعث بالا رفتن شعاع حفاظتی شده است (اکبرپور و همکاران، ۱۳۹۰).

بدو 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 تاپس و اشکال متغیر ساده شده^۲ (SVS) را با مدل تحلیلی WHPA^۳ مقایسه نمود. وی به این نتیجه رسید که حریم‌های حفاظتی ترسیم شده توسط روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، تاپس و اشکال متغیر ساده شده به مراتب بزرگ‌تر از حریم‌های ترسیمی توسط مدل تحلیلی WHPA بوده بنابراین در صورت کافی بودن اطلاعات، استفاده از حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط مدل‌های تحلیلی اقتصادی‌تر است (بدو، ۱۳۸۳). رحمان و شهید از مدل عددی جهت ترسیم حریم حفاظتی هفت حلقه چاه در نزدیکی شهر داکا در کشور بنگلادش استفاده نموده‌اند. در این تحقیق اثرات شرایط مرزی جریان آب زیرزمینی بر حریم حفاظتی بررسی شد (Rahman and Shahid., 2008).

حفاظت کیفی از منابع آب زیرزمینی که برای تامین آب شرب استحصالی از چاه‌ها نقش دارند، امروزه از مسئولیت‌ها و دغدغه‌های فکری متولیان تامین و توزیع آب شرب یعنی شرکت‌های آب منطقه- ای و شرکت‌های آب و فاضلاب سراسر کشور محسوب می‌شود. در

این راستا محاسبه بهینه و دقیق حریم‌ها با استفاده از مبانی علمی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا محاسبه و اعمال حریم کوچک‌تر خطر آلودگی آب چاه را بالا برده و حریم بزرگ‌تر اتلاف سرمایه را به دنبال خواهد داشت. در این مقاله ضمن تعیین حریم حفاظتی ۶ حلقه چاه آب شرب روستایی دشت بیرجند توسط روش استاندارد و دقیق مدل عددی، میزان انطباق حریم‌های حفاظتی ترسیم شده توسط روش شعاع ثابت محاسبه‌ای و دو روش تحلیلی KLF و Wyssling با حریم ترسیم شده توسط مدل عددی در زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

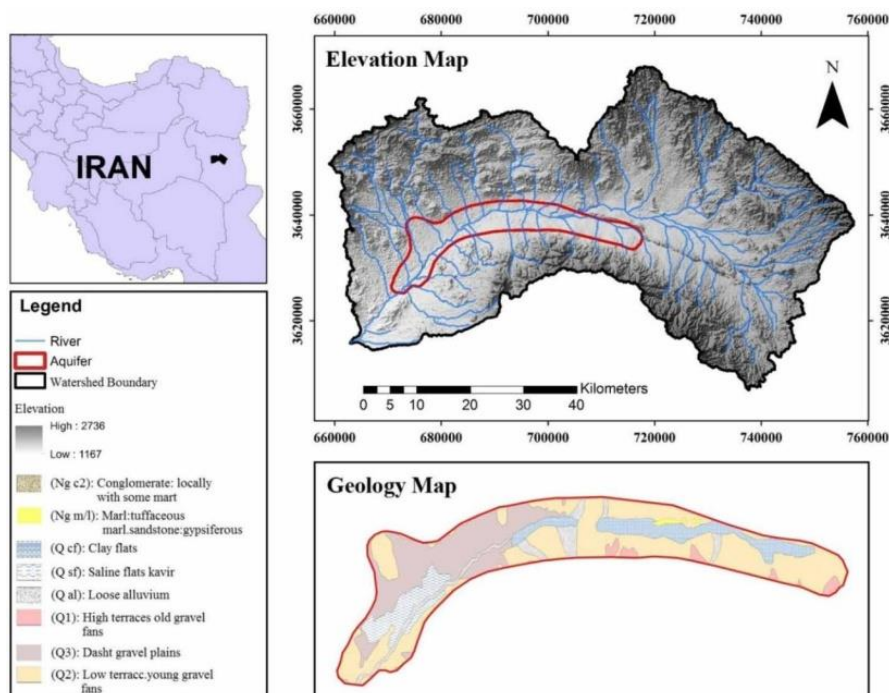
معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دشت بیرجند است که در قسمت شمالی ارتفاعات باقران با مختصات تقریبی ۳۲ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۸ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی و ۵۸ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۴ دقیقه طول جغرافیایی شرقی قرار گرفته است که در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه آورده شده است. حوضه آبریز بیرجند دارای وسعت ۳۱۵۵ کیلومتر مربع بوده، که ۱۸۴۵ کیلومتر مربع آن دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. این دشت حالت کشیده داشته و تمامی پیرامون آن را ارتفاعات و بخش مرکزی را آبخوان آبرفتی تشکیل می‌دهد. از شرق به ارتفاعات مومن‌آباد و سیستان و از جنوب به کوه‌های باقران و کوه رج، از شمال به ارتفاعات شاه ناصر و اسفدن و بنددره و از غرب به ارتفاعات چنگدر و گرونک محدود می‌شود. دشت بیرجند از لحاظ طبقه بندی‌های اقلیمی جزو مناطق خشک محسوب می‌شود. از نظر توپوگرافی حداکثر ارتفاع حوضه از سطح دریا ۲۷۸۷ متر در ارتفاعات شمالی منطقه (کوه بنددره) و حداقل ارتفاع نیز ۱۱۸۰ متر در خروجی دشت (فدشک) می‌باشد (همراز و همکاران، ۱۳۹۴).

در این تحقیق به منظور مقایسه روش‌های ترسیم حریم حفاظتی از داده‌های ۶ حلقه چاه آب شرب، شرکت آب و فاضلاب روستایی خراسان جنوبی استفاده شد. تمامی چاه‌های مورد مطالعه در داخل آبخوان آبرفتی دشت بیرجند حفر شده و از نظر زمین شناسی، رسوبات تشکیل دهنده آبخوان به طور عمده از شن، ماسه و به مقدار کم-تر سیلت و رس تشکیل شده است. در جدول ۱ مشخصات کلی چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. بر اساس جدول ۱ آبدی متوسط چاه‌های مورد مطالعه در محدوده ۵/۵۸۷ الی ۲۵۹۲ مترمکعب بر روز در تغییر است. از نظر هیدرولوژیکی، جهت غالب جریان آب زیرزمینی از شرق به جنوب غربی می‌باشد. در جدول ۲ نیز پارامترهای هیدرولیکی آبخوان در محل چاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. به منظور تعیین حریم حفاظتی چاه‌های شرب مورد مطالعه از روش شعاع

- 1 - Wellhead Analytic Element Model
- 2 - Simplified Variable Shapes
- 3 - Well Head Protection Area

ثابت محاسبه‌ای و دو روش تحلیلی و مدل عددی استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (Sadeghi Tabas et al., 2017)

جدول ۱- مشخصات کلی چاه‌های شرب منطقه مورد مطالعه

کلاسه چاه	نام چاه	X.utm	Y.utm	آبدهی (m ³ /day)	تراز آب زیرزمینی (m)	ضخامت اشباع آبخوان (m)
۴۰۰۴۰۸	علی‌آباد	۷۱۴۹۴۵	۳۶۳۵۹۶۲	۸۶۴	۱۳۹۵	۱۶
۴۰۰۰۴۰	کوثر ۱	۷۰۲۱۵۶	۳۶۳۹۳۳۱	۱۶۴۱/۶	۱۳۶۰	۲۱
۴۰۰۲۸۷	کوثر ۲	۷۰۱۷۲۰	۳۶۳۸۸۲۵	۱۵۵۵/۲	۱۳۶۶	۲۳
۴۰۰۶۸۰	کوثر ۳	۷۰۲۷۱۸	۳۶۳۸۹۷۸	۱۱۵۷/۸	۱۳۶۵	۲۷
۴۰۰۴۷۱	رکات	۶۹۳۸۰۹	۳۶۳۹۴۷۱	۵۸۷/۵	۱۳۴۵	۴۷
۴۰۰۰۴۶	محمدیه	۶۸۷۴۲۶	۳۶۳۸۶۴۰	۲۵۹۲	۱۳۱۷	۱۶

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی آبخوان در محل چاه‌های شرب مورد مطالعه

کلاسه چاه	گرادیان هیدرولیکی	هدایت هیدرولیکی (m/day)	ضریب قابلیت انتقال (m ² /day)
۴۰۰۴۰۸	-/۰.۰۲	۱۲.۵	۲۰۰
۴۰۰۰۴۰	-/۰.۰۲	۴۳	۹۰.۳
۴۰۰۲۸۷	-/۰.۰۴	۴۳	۹۸۹
۴۰۰۶۸۰	-/۰.۰۴	۴۲	۱۱۳۴
۴۰۰۴۷۱	-/۰.۰۶	۲۵	۱۱۷۵
۴۰۰۰۴۶	-/۰.۰۴	۲۰	۳۲۰

روش تحقیق

روش شعاع ثابت محاسبه‌ای

روش شعاع ثابت محاسبه‌ای روش به نسبت ساده‌ای است که

برای بسیاری از منابع آب (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

های Wyssling و KLF استفاده شده است.

روش Wyssling

روش Wyssling از روش‌های آلمانی جهت تعیین حریم حفاظتی چاه بوده که توسط شخصی به همین نام در سال ۱۹۷۹ ارائه گردید. این روش، تحلیل ساده برای آبخوان‌های همگن و متخلخل می‌باشد. روش مذکور برای یک چاه در حال پمپاژ و گرادیان هیدرولیکی شیب-دار که باعث ایجاد مخروط افت متقارن می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Puchalski., 2009). روابط مورد استفاده در این روش به صورت روابط ۲ تا ۹ می‌باشند:

$$Q = kBbi \quad (۲)$$

$$B = \frac{Q}{kbi} \quad (۳)$$

$$B' = \frac{B}{2} \quad (۴)$$

$$V = \frac{ki}{n} \quad (۵)$$

$$L = V \cdot t \quad (۶)$$

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

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

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

در روابط فوق Q میزان پمپاژ (مترمکعب بر روز)، 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 موثر (متر بر روز)، L پارامتر بدون بعد، X_o فاصله پایین دست چاه تا منطقه تسخیر، S_o فاصله حفاظتی بالادست چاه (متر) و S_u فاصله حفاظتی پایین دست چاه (متر) می‌باشند. در این روش بر خلاف 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.

روش KLF

در سال ۲۰۰۱ متخصصین آب زیرزمینی در کشور پرتغال، 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). طبق این روش حریم حفاظتی دارای شکلی بیضوی بوده که با کاهش گرادیان هیدرولیکی، به شکل دایره

از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز برای استفاده از روش پیچیده‌تر و مناسب‌تر بکار می‌رود. در این روش دایره‌ای در اطراف چاه (به مرکزیت چاه) ترسیم می‌شود که شعاع دایره بر اساس 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 دوره زمانی معین، تأمین می‌کند. اگر بخشی از آبخوان را که تحت تاثیر چاه در حال پمپاژ قرار دارد به صورت استوانه در نظر بگیریم رابطه نهایی جهت محاسبه شعاع استوانه به شکل رابطه ۱ خواهد بود (Puchalski., 2009).

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

در این رابطه r شعاع استوانه (متر)، Q میزان پمپاژ (مترمکعب بر روز)، H طول اسکرین یا بخش مشبک چاه (بر حسب 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. همان‌طوری که 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 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.

روش‌های تحلیلی

در این روش‌ها از یکسری معادلات تحلیلی، بر پایه اطلاعات هیدروژئولوژیکی، برای محاسبه نواحی تسخیر یا حریم حفاظتی چاه استفاده می‌گردد. اصول کلی در این روش‌ها محاسبه فواصل بالادست، پایین دست 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 ایستابی هموار یا شیب دار قابل استفاده می‌باشند. علیرغم در نظر گرفتن اکثر پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان و جریان آب زیرزمینی، اشکال اصلی این روش‌ها، در نظر گرفتن یکسری فرضیات و ساده‌انگاری-هایی است که با شرایط واقعی آبخوان متفاوت می‌باشد. به‌عنوان 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، دو روش متداول به نام-

گرافیکی برای شبیه‌سازی‌های جریان آب زیرزمینی است. در واقع GMS شامل یک انترفاز کارتوگرافیکی کاربر و تعدادی کدهای تحلیلی نظیر SEAM3D, RT3D, MT3DMS, MODFLOW, UTCHEM, FEMWATER, SEEP2D, MODPATH می‌باشد. انترفاز GMS توسط Environment Modeling Research Laboratory از دانشگاه Brigham Young با مشارکت US.Army Engineer Waterways Experiments Station تهیه شده است. در GMS انواع مختلف مدل‌ها پشتیبانی می‌گردد و تسهیلات زیادی برای به اشتراک گذاشتن اطلاعات بین مدل‌های مختلف و انواع داده‌ها در آن فراهم شده است. مدل MODPATH یک بسته نرم‌افزاری پس پردازشی ردیابی ذرات است که توسط سازمان زمین شناسی آمریکا ارایه شده است. روش ردیابی ذرات به نوعی شکلی از مدل-سازی حرکت آلاینده است که در آن فقط حرکت جرمی آب زیرزمینی بررسی می‌شود. این روش تنها فرآیند انتقال را بررسی می‌کند و فرآیندهای پخشیدگی، پراکندگی و واکنش شیمیایی را در نظر نمی‌گیرد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۲).

به منظور تهیه مدل جریان آب زیرزمینی، اولین قدم ساخت یک مدل مفهومی از سیستم زیرسطحی است. در این تحقیق تعیین مدل مفهومی دشت بیرجند در شش مرحله انجام پذیرفت: (۱) جمع‌آوری همه داده‌ها و اطلاعات موجود، (۲) تعیین و آزمون داده‌های مشاهده-ای، (۳) تعیین هندسه آبخوان، (۴) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، (۵) شناسایی و تعیین منابع تخلیه و تغذیه سیستم جریان زیرزمینی، (۶) ادغام نتایج مراحل قبل برای دستیابی به مدل مفهومی. آبخوان دشت بیرجند یک لایه و آزاد با ضخامت متغیر بین ۵ تا ۲۲۵ متر است. عمیق‌ترین قسمت آبخوان واقع در شرق دشت با ضخامتی متغیر بین ۱۵۰ تا ۲۲۵ متر است. مدل‌سازی آبخوان با توسعه مدل مفهومی و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز انجام پذیرفت. داده‌های مورد نیاز شامل: نقشه زمین‌شناسی منطقه، تصاویر ماهواره-ای، مختصات جغرافیایی پیزومترها و چاه‌های بهره‌برداری، داده‌های تراز چاه‌های مشاهده‌ای در سطح زمین، گزارش‌های موجود ژئوفیزیک، هیدرولوژی، هیدروژئولوژی، میزان تغذیه، داده‌های هیدروشیمی آبخوان در چاه‌های مشاهده‌ای، داده‌های چاه‌های بهره-برداری (دبی پمپاژ، عمق حفاری، اسکرین گذاری)، عمق چاه‌های مشاهده‌ای، نقشه توپوگرافی سطحی، نقشه سنگ کف آبخوان می-باشند. مقادیر اولیه ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان شامل هدایت هیدرولیکی و ابدهی ویژه، به ترتیب مقادیری بین ۳ تا ۶۰ متر در روز و ۰/۰۳ تا ۰/۱۳۵، از غرب به شرق دشت را دارا می‌باشند. برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی از معادله خطی شده بوزینسک (معادله ۱۵) با در نظر گرفتن عبارت تغذیه و تخلیه R برای آبخوان بیرجند استفاده گردید.

نزدیک‌تر می‌گردد. در این روش از سه رابطه برای محاسبه فواصل حفاظتی به شرح زیر استفاده می‌گردد (روابط ۱۰ تا ۱۴).

$$r_{max} = \frac{(0.00002x^5 - 0.0009x^4 + 0.015x^3 + 0.37x^2 + x)}{F} \quad (10)$$

$$r_{min} = \frac{(0.042x^3 + 0.37x^2 + 1.04x)}{F} \quad (11)$$

$$r_p = 4 \sqrt{\frac{Q}{nb}} \quad (12)$$

$$F = \frac{(2\pi kbi)}{Q} \quad (13)$$

$$x = 2ki \left[\frac{\pi b t}{Qn} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

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 پارامترهای بدون بعد، r_{max} فاصله بالادست حریم حفاظتی (متر)، r_{min} فاصله پایین‌دست حریم حفاظتی (متر) و r_p عرض حریم حفاظتی عمود بر جهت جریان (متر) می‌باشند.

مدل عددی

امروزه مدل عددی به‌عنوان روشی استاندارد و متداول جهت ترسیم حریم حفاظتی‌چاه در بسیاری از نقاط دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد (Frind and Mohammad., 2005). در این مدل‌ها معادله اصلی جریان آب زیرزمینی از طریق روش‌های تقریب‌زنی به شکلی در می‌آید که به راحتی و به سرعت توسط یک کامپیوتر قابل حل باشد. سپس با استفاده از ترکیب تکنیک‌های حل ماتریسی و تکرار، 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 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. به طوری که این مدل‌ها توانایی شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی، مرزهای جریان پیچیده و غیرخطی، چاه‌های ناقص، آبخوان‌های چند لایه، ناهمگن و ناهمسانگرد را دارا می‌باشند. بنابراین مدل عددی مطمئن‌ترین روش جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه محسوب می‌شود (Theodossiou and Latinopoulos., 2009).

مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق مدل GMS^1 بوده که یک مدل جریان و انتقال سه‌بعدی است. GMS محیطی جامع و

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h^2}{\partial z} \right] = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \quad (15)$$

که در آن K_x ، K_y و K_z مولفه‌های هدایت هیدرولیکی، S_y آبدهی ویژه و h بار پتانسیل و R تغذیه و تخلیه است. برای حل این معادلات از روش شبکه‌بندی تفاضل محدود در MODFLOW استفاده شده است. شبکه‌بندی مدل در ۱۹۰ ستون و ۶۹ سطر با فواصل یکسان ۲۵۰ در ۲۵۰ متر تشکیل شده است که ۴۳۹۴ سلول آن فعال در نظر گرفته شد. شرایط مرزی و شرایط اولیه آبخوان، مقادیر تغذیه و تخلیه مدل و اطلاعات پمپاژ ۱۹۰ چاه به مدل وارد گردید. یازده چاه به عنوان چاه‌های مشاهده‌ای در دشت موجود است و مدل‌سازی برای حالت ماندگار و غیرماندگار انجام پذیرفت. واسنجی اولیه مدل در حالت ماندگار توسط روش واسنجی خودکار PEST انجام گردید. سپس با استفاده از مدل MODPATH مسیره‌های جریان آب زیرزمینی در اطراف چاه‌های مورد مطالعه محاسبه در نهایت مناطق تسخیر چاه‌های شرب روستایی دشت بیرجند با زمان‌های سیر ۱۸۰ روز، ۱، ۵ و ۱۰ سال ترسیم گردید.

مدل MODPATH مسیر حرکت ذرات آب یا آلاینده برای هر چاه آب شرب را ترسیم می‌کند که در واقع این مسیره‌های حرکت ذرات، منطقه تسخیر چاه را مشخص می‌کنند. برای ترسیم منطقه تسخیر چاه، مدل مذکور یک ذره فرضی مانند یک ملکول 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. سپس مدل، حرکت ذره از میان شبکه را ردیابی می‌کند. این مدل از روش مکان‌یابی ذره ای معکوس 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 را مشخص کرد از این طریق، سعی و خطای همراه با ردیابی ذره‌ای مستقیم برای تعیین نواحی تغذیه چاه، حذف خواهد شد. از طریق انتخاب و تعیین تعدادی از ذرات آب در اطراف یک چاه و ردیابی معکوس، مرز خارجی منطقه حریم حفاظتی مشخص می‌گردد (Bingham., 2010).

نتایج و بحث

با توجه به نقش کلیدی موقعیت مکانی چاه در تعیین حریم حفاظتی، در ابتدا طی بازدید انجام شده موقعیت جغرافیایی چاه‌های شرب مورد مطالعه تعیین گردید. سپس حریم حفاظتی ۶ حلقه چاه شرب مورد مطالعه با استفاده از روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، روش‌های تحلیلی KLF و Wyssling و روش مدل عددی در محیط نرم‌افزار GMS با استفاده از نتایج مدل واسنجی شده جریان آب زیرزمینی در دشت بیرجند برای سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ محاسبه گردید.

در جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ نتایج محاسبات حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه توسط روش‌های فواصل حریم حفاظتی محاسبه شده توسط روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، روش‌های تحلیلی KLF و Wyssling و روش مدل عددی برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال ارائه شده است. بر این اساس در روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، شعاع متوسط حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر ۱۶۹، ۲۴۱، ۵۳۸ و ۷۶۱ متر محاسبه گردید. در روش تحلیلی Wyssling، فاصله بالادست متوسط حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر ۲۳۴، ۳۷۹، ۱۳۴۲ و ۲۴۷۳ متر محاسبه گردید. در روش تحلیلی KLF، فاصله بالادست متوسط حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر ۲۵۴، ۴۱۷، ۱۴۷۱ و ۲۶۷۸ متر محاسبه گردید. همچنین با استفاده از مدل عددی، فاصله بالادست متوسط حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر ۱۹۹، ۲۸۱، ۸۹۷ و ۱۴۷۲ متر محاسبه گردید. حریم‌های حفاظتی چاه‌های کوثر ۱، کوثر ۲ و کوثر ۳ ترسیم شده توسط مدل عددی برای زمان حرکت‌های ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب در اشکال ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. در حالت طبیعی حریم حفاظتی به سمت بالادست جریان گسترش می‌یابد. با افزایش زمان حرکت فاصله بالادست حریم در مقایسه با فاصله پایین‌دست آن افزایش یافته است که این مسئله سبب کشیدگی و بزرگ شدن حریم حفاظتی به سمت بالادست جریان آب زیرزمینی می‌گردد. مطابق اشکال ۲، ۳ و ۴ حریم حفاظتی ۱۰ ساله نسبت به ۵ ساله و ۱ ساله به دلیل افزایش طول بخش بالادست در مقایسه با بخش پایین‌دست، دارای اندازه بزرگ‌تر و شکل بیضی کشیده می‌باشد.

با توجه به اشکال ۲، ۳ و ۴ ملاحظه می‌گردد که حریم‌های حفاظتی ترسیم شده برای چاه‌های کوثر ۱، کوثر ۲ و کوثر ۳ بر اساس روش مدل عددی برای زمان حرکت ۱۰ ساله نسبت به ۵ ساله و ۱ ساله به ترتیب بطور متوسط ۲ و ۵ برابر شده است.

در حالی که فاصله پایین‌دست حریم حفاظتی چاه‌های فوق تغییر چندانی نکرده است. بنابراین به منظور مقایسه روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای و روش‌های تحلیلی KLF و Wyssling با مدل عددی از فاصله بالادست حریم حفاظتی استفاده گردید. بر اساس جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ میزان متوسط اختلاف شعاع حریم‌های بالادست محاسبه شده توسط دو روش مدل عددی و شعاع ثابت محاسبه‌ای برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر ۳۰، ۴۰، ۳۱۴ و ۷۱۱ متر می‌باشد. بنابراین با افزایش زمان حرکت، از میزان انطباق حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط روش شعاع ثابت محاسبه‌ای با مدل عددی کاسته می‌شود. به منظور درک بهتر مطلب در

اشکال ۵ و ۶ به ترتیب حریم‌های حفاظتی ۱ و ۵ ساله ترسیم شده
 هایکوثر ۱ و کوثر ۲ با یکدیگر مقایسه شد.
 توسط روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای و مدل عددی برای چاه-

جدول ۳- فواصل حریم حفاظتی محاسبه شده چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکت ۱۸۰ روز (متر)

مدل عددی	KLF		Wyssling		CFR	کلاسه چاه
	پایین دست	بالادست	پایین دست	بالادست		
۱۸۳	۳۶۴	۳۷۳	۲۲۸	۳۴۰	۲۷۸	۴۰۰۴۰۸
۲۰۱	۱۵۸	۱۶۲	۹۸	۱۴۸	۱۲۰	۴۰۰۴۰
۱۹۴	۱۹۵	۱۹۵	۷۳	۱۷۶	۱۱۴	۴۰۰۲۸۷
۲۱۶	۱۷۱	۱۶۹	۵۳	۱۵۴	۹۱	۴۰۰۶۸۰
۱۶۷	۱۱۱	۱۱۴	۲۱	۱۰۳	۴۷	۴۰۰۴۷۱
۲۳۴	۵۲۳	۵۳۱	۲۷۶	۴۸۱	۳۶۴	۴۰۰۴۶

جدول ۴- فواصل حریم حفاظتی محاسبه شده چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکت یک سال (متر)

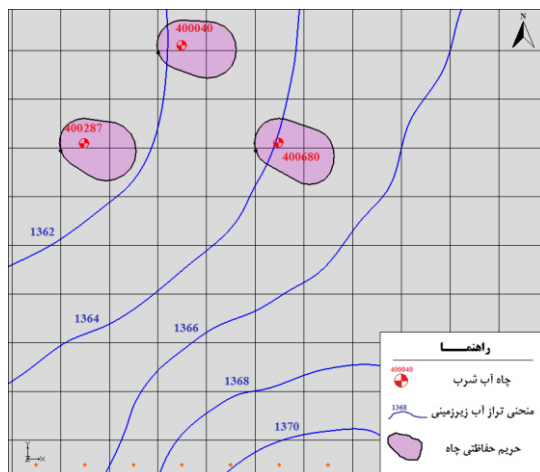
مدل عددی	KLF		Wyssling		CFR	کلاسه چاه
	پایین دست	بالادست	پایین دست	بالادست		
۲۴۵	۵۷۲	۶۰۳	۲۹۸	۵۲۶	۳۹۶	۴۰۰۴۰۸
۲۸۵	۲۴۹	۲۶۳	۱۲۸	۲۲۹	۱۷۱	۴۰۰۴۰
۲۷۳	۳۳۱	۳۶۹	۸۸	۲۹۷	۱۶۲	۴۰۰۲۸۷
۳۱۱	۲۹۶	۳۴۰	۶۲	۲۶۷	۱۲۹	۴۰۰۶۸۰
۲۱۰	۲۰۷	۲۶۱	۲۳	۱۸۹	۶۶	۴۰۰۴۷۱
۳۶۰	۸۴۶	۹۰۴	۳۵۰	۷۶۸	۵۱۹	۴۰۰۴۶

جدول ۵- فواصل حریم حفاظتی محاسبه شده چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکت ۵ سال (متر)

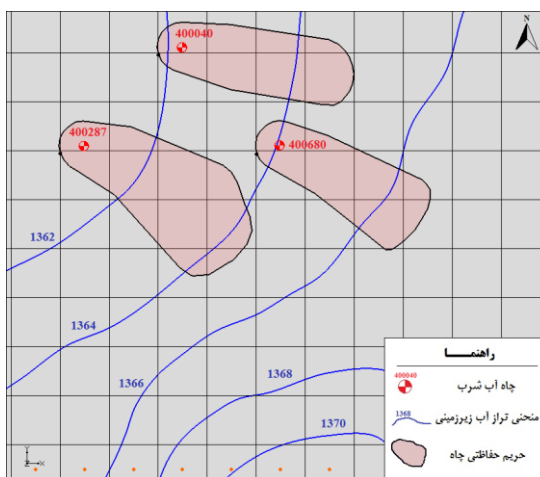
مدل عددی	KLF		Wyssling		CFR	کلاسه چاه
	پایین دست	بالادست	پایین دست	بالادست		
۴۵۲	۱۸۰۵	۲۰۱۲	۴۸۳	۱۶۲۴	۸۸۶	۴۰۰۴۰۸
۸۸۹	۷۹۲	۸۸۵	۲۰۶	۷۱۲	۳۸۳	۴۰۰۴۰
۶۹۴	۱۲۶۳	۱۶۵۹	۱۱۳	۱۱۵۹	۳۶۲	۴۰۰۲۸۷
۸۱۷	۱۱۸۴	۱۶۶۵	۷۶	۱۰۹۸	۲۸۸	۴۰۰۶۸۰
۷۰۸	۹۰۰	۱۵۴۷	۲۵	۸۵۵	۱۴۸	۴۰۰۴۷۱
۱۵۵۳	۲۸۸۴	۳۳۸۰	۵۱۷	۲۶۰۳	۱۱۶۰	۴۰۰۴۶

جدول ۶- فواصل حریم حفاظتی محاسبه شده چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکت ۱۰ سال (متر)

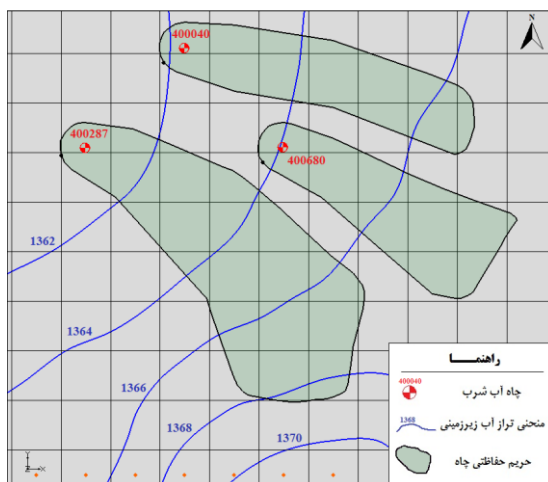
مدل عددی	KLF		Wyssling		CFR	کلاسه چاه
	پایین دست	بالادست	پایین دست	بالادست		
۶۳۳	۳۱۴۰	۳۶۸۹	۵۵۴	۲۸۳۵	۱۲۵۳	۴۰۰۴۰۸
۱۵۲۱	۱۳۸۱	۱۶۳۱	۲۳۵	۱۲۴۸	۵۴۱	۴۰۰۴۰
۱۸۰۸	۲۳۶۸	۳۵۱۸	۱۱۸	۲۲۱۱	۵۱۲	۴۰۰۲۸۷
۱۲۰۳	۲۲۴۸	۳۶۵۸	۷۸	۲۱۲۲	۴۰۸	۴۰۰۶۸۰
۱۶۹۶	۱۷۴۰	۳۶۵۰	۲۶	۱۶۸۵	۲۱۰	۴۰۰۴۷۱
۱۹۷۰	۵۱۹۱	۶۵۷۵	۵۶۸	۴۷۳۹	۱۶۴۰	۴۰۰۴۶



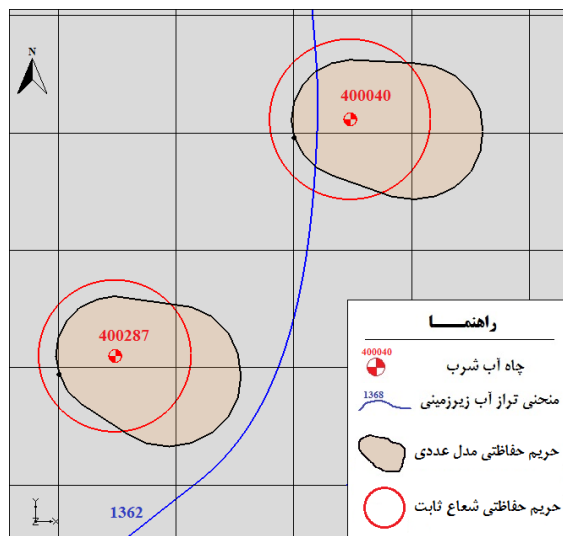
شکل ۲- حریم حفاظتی چاه‌های کوثر ۱، ۲ و ۳ توسط مدل عددی برای زمان حرکت ۱ سال



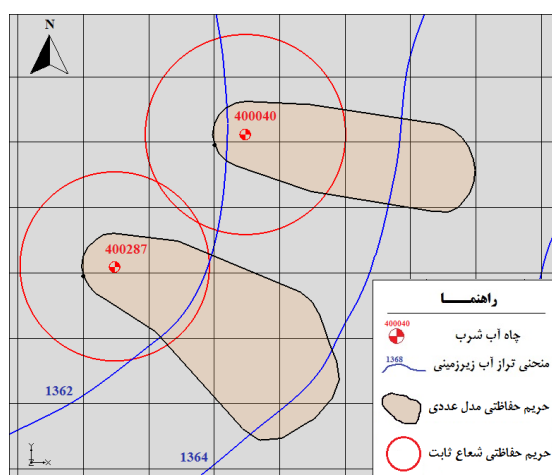
شکل ۳- حریم حفاظتی چاه‌های کوثر ۱، ۲ و ۳ توسط مدل عددی برای زمان حرکت ۵ سال



شکل ۴- حریم حفاظتی چاه‌های کوثر ۱، ۲ و ۳ توسط مدل عددی برای زمان حرکت ۱۰ سال



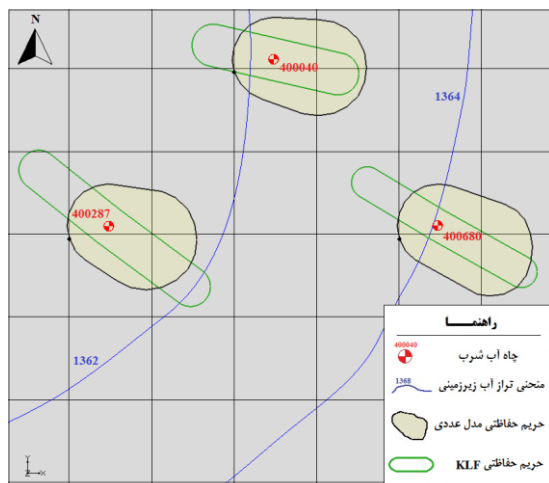
شکل ۵- مقایسه حریم حفاظتی چاه‌های کوثر ۱ و ۲ توسط شعاع ثابت و مدل عددی برای زمان حرکت ۱ سال



شکل ۶- مقایسه حریم حفاظتی چاه‌های کوثر ۱ و ۲ توسط شعاع ثابت و مدل عددی برای زمان حرکت ۵ سال

تحلیلی KLF و Wyssling تقریباً مشابه یکدیگر بوده (R²=0.96) ولی فواصل پایین دست حریم‌های حفاظتی در دو روش مذکور شباهتی به یکدیگر نداشته و همبستگی پایینی با یکدیگر دارند (R²=0.46). در شکل ۷ حریم حفاظتی چاه‌های کوثر ۱، ۲ و ۳ توسط روش تحلیلی KLF با حریم حفاظتی ترسیمی توسط مدل عددی برای زمان حرکت ۱ سال نشان داده شده است. مقایسه روش تحلیلی مذکور با مدل عددی نشان می‌دهد که طول حریم بالادست و پایین دست محاسبه شده به روش KLF نسبت به مدل عددی بزرگ‌تر می‌باشد و در عوض، حریم جانبی محاسبه شده توسط روش KLF کم‌تر می‌باشد و بخش قابل ملاحظه‌ای از فواصل جانبی حریم حفاظتی مدل عددی را پوشش نمی‌دهند.

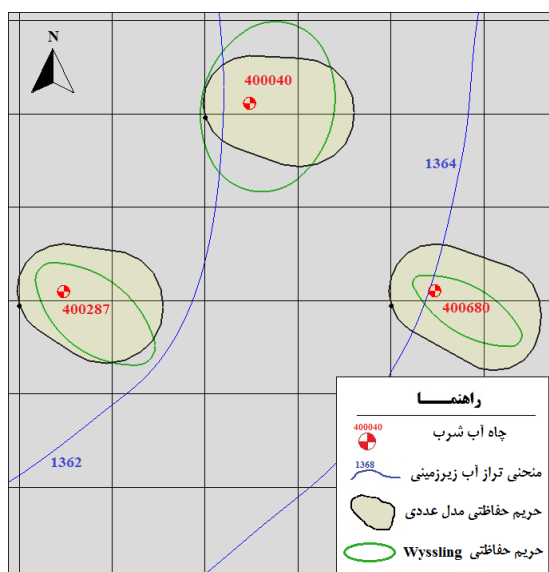
بر اساس روش تحلیلی Wyssling، فاصله بالادست متوسط حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکت‌های ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۳۴، ۳۷۹، ۱۳۴۲ و ۲۴۷۳ متر محاسبه شد. فاصله پایین دست متوسط حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه نیز برای زمان حرکت‌های ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۱۲۵، ۱۵۸، ۲۳۷ و ۲۶۳ متر برآورد شد. همچنین طبق روش تحلیلی KLF، فاصله بالادست متوسط حریم حفاظتی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکت‌های ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۵۷، ۴۵۷، ۱۸۵۸ و ۳۷۸۷ متر و فاصله پایین دست متوسط حریم حفاظتی به ترتیب برابر با ۲۵۴، ۴۱۷، ۱۴۷۱ و ۲۶۷۸ متر برآورد شد. بر اساس جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ فواصل بالادست حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط روش‌های



شکل ۷- مقایسه حريم حفاظتی چاه‌های کوثر ۲، ۱ و ۳ توسط روش KLF و مدل عددی برای زمان حرکت ۱ سال

Wyssling کم‌تر می‌باشد و بخش قابل ملاحظه‌ای از فواصل جانبی حريم حفاظتی مدل عددی را پوشش نمی‌دهند. اما مشاهده می‌شود برای چاه کوثر ۱ با توجه به این‌که گرادیان هیدرولیکی آن نسبت به چاه‌های کوثر ۲ و ۳ کم‌تر بوده، حريم حفاظتی جانبی آن بیش‌تر از مدل عددی می‌باشد، بنابراین پارامتر گرادیان هیدرولیکی در روش تحلیلی Wyssling در تعیین حريم حفاظتی مهم و موثر می‌باشد.

همچنین در شکل ۸ حريم حفاظتی چاه‌های کوثر ۲، ۱ و ۳ توسط روش تحلیلی Wyssling با حريم حفاظتی ترسیمی توسط مدل عددی برای زمان حرکت ۱ سال نشان داده شده است. مقایسه روش تحلیلی مذکور با مدل عددی نشان می‌دهد که طول حريم بالادست و پایین محاسبه شده به روش Wyssling تا حدودی مدل عددی یکسان می‌باشد و در عوض، حريم جانبی محاسبه شده توسط روش



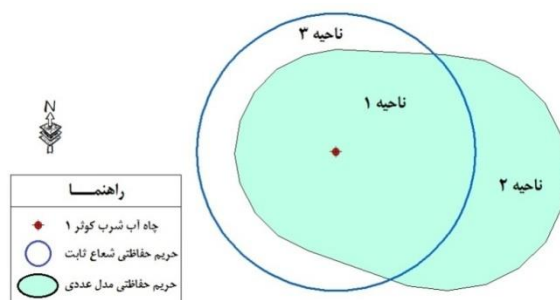
شکل ۸- مقایسه حريم حفاظتی چاه‌های کوثر ۲، ۱ و ۳ توسط روش Wyssling و مدل عددی برای زمان حرکت ۱ سال

Arc Map استفاده گردید. از طریق ابزار مذکور امکان انتخاب بخش‌هایی از یک شکل گرافیکی به صورت تعدادی چند ضلعی مجزا میسر می‌گردد. با این روش می‌توان مساحت هر کدام از چند ضلعی‌های ایجاد شده را به صورت جداگانه محاسبه نمود. به عبارت دیگر مساحت بخش‌های دارای هم‌پوشانی و عدم هم‌پوشانی حريم حفاظتی

پس از برآورد حريم حفاظتی چاه‌های منطقه مورد مطالعه (جداول ۳ الی ۶)، به منظور مقایسه میزان هم‌پوشانی و محاسبه درصد کارآمدی روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، تحلیلی Wyssling و KLF، حريم‌های حفاظتی در محیط GIS رسم شده و از ابزار Subtract و Intersect موجود در بخش Graphic Operation نرم‌افزار

باشد. 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 به ترتیب درصد عدم هم‌پوشانی یا عدم تسخیر و درصد تسخیر اضافی حاصل می‌شود. بر این اساس بهترین هم‌پوشانی زمانی اتفاق می‌افتد که درصد تسخیر (کارآمدی) حداکثر و درصد‌های عدم تسخیر و تسخیر اضافی حداقل باشد. در جداول ۷، ۸ و ۹ به ترتیب نتایج هم‌پوشانی حریم روش‌های شعاع ثابت، تحلیلی Wyssling، KLF با حریم مدل عددی برای زمان حرکت یک سال ارائه شده است.

روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، تحلیلی Wyssling، KLF با حریم حفاظتی مدل عددی برای چاه‌های مورد مطالعه محاسبه می‌شود. بر این اساس سه ناحیه مطابق شکل ۹ برای چاه کوثر ۱ استخراج می‌گردد. ناحیه ۱ شامل بخش از حریم مدل عددی که توسط حریم شعاع ثابت تسخیر شده است (دارای هم‌پوشانی). ناحیه ۲ شامل قسمتی از حریم عددی که توسط حریم شعاع ثابت تسخیر نشده است (عدم هم‌پوشانی) و ناحیه ۳ شامل بخشی از حریم شعاع ثابت که در خارج حریم مدل عددی قرار می‌گیرد (تسخیر اضافی). 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 می‌



شکل ۹- نواحی مورد استفاده جهت محاسبه میزان کارآمدی روش شعاع ثابت محاسبه‌ای

جدول ۷- نتایج هم‌پوشانی حریم‌های شعاع ثابت و مدل عددی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکت ۱ سال

کلاس چاه	مساحت نواحی (مترمربع)			کارآمدی (%)	عدم تسخیر (%)	تسخیر اضافی (%)
	۱	۲	۳			
۴۰۰۴۰۸	۸۷۸۶۶	۰	۴۰۴۶۲۰	۱۰۰	۰	۸۲/۱۶
۴۰۰۰۴۰	۶۴۹۵۵	۳۰۷۴۹	۲۶۸۳۷	۶۷/۸۷	۳۲/۱۳	۲۹/۲۴
۴۰۰۲۸۷	۶۲۹۰۳	۳۲۸۰۰	۱۹۴۷۸	۶۵/۷۳	۴۳/۲۷	۲۳/۶۴
۴۰۰۶۸۰	۴۹۵۴۳	۴۹۸۶۹	۲۶۹۱	۴۹/۸۳	۵۰/۱۷	۵/۱۵
۴۰۰۴۷۱	۱۳۶۵۸	۵۷۲۴۵	۰	۱۹/۲۶	۸۰/۷۴	۰
۴۰۰۰۴۶	۱۱۸۱۰۷	۰	۷۳۷۹۰۱	۱۰۰	۰	۸۶/۰۴

جدول ۸- نتایج هم‌پوشانی حریم‌های تحلیلی Wyssling و مدل عددی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکت ۱ سال

کلاس چاه	مساحت نواحی (مترمربع)			کارآمدی (%)	عدم تسخیر (%)	تسخیر اضافی (%)
	۱	۲	۳			
۴۰۰۴۰۸	۸۷۸۶۶	۰	۶۲۱۴۸۲	۱۰۰	۰	۸۷/۶۱
۴۰۰۰۴۰	۸۴۴۵۴	۱۱۲۵۱	۴۴۶۹۲	۸۸/۲۴	۱۱/۷۶	۳۴/۶۱
۴۰۰۲۸۷	۵۴۰۴۶	۴۱۶۵۷	۲۷۳۹	۵۶/۴۷	۴۳/۵۳	۴/۸۲
۴۰۰۶۸۰	۳۱۸۴۶	۶۷۵۵۷	۰	۳۲/۰۴	۶۷/۹۶	۰
۴۰۰۴۷۱	۶۶۲۹	۶۴۲۷۴	۰	۹/۳۵	۹۰/۶۵	۰
۴۰۰۰۴۶	۱۱۸۱۰۷	۰	۷۷۵۵۱۲	۱۰۰	۰	۸۶/۷۸

جدول ۹- نتایج هم‌پوشانی حریم‌های تحلیلی KLF و مدل عددی چاه‌های مورد مطالعه برای زمان حرکت ۱ سال

کلاس چاه	مساحت نواحی (مترمربع)			کارآمدی (%)	عدم تسخیر (%)	تسخیر اضافی (%)
	۱	۲	۳			
۴۰۰۴۰۸	۸۷۰۴۱	۸۲۵	۲۴۰۳۵۰	۹۹/۰۶	۰/۹۴	۷۳/۴۱
۴۰۰۰۴۰	۴۷۱۱۱	۴۸۹۵۴	۱۵۲۹۹	۴۹/۲۳	۵۰/۷۷	۲۵/۴۱
۴۰۰۲۸۷	۴۵۷۶۴	۴۹۹۳۹	۳۵۱۹۰	۴۷/۸۲	۵۲/۱۸	۴۳/۴۷
۴۰۰۶۸۰	۴۰۵۷۵	۵۸۸۲۸	۱۸۴۴۶	۴۰/۸۲	۵۹/۱۸	۳۱/۲۵
۴۰۰۴۷۱	۱۶۴۸۲	۵۴۴۲۱	۶۳۹۱	۲۳/۲۵	۷۶/۷۵	۲۷/۹۴
۴۰۰۰۴۶	۱۱۸۱۰۷	۰	۵۲۰۹۹۶	۱۰۰	۰	۸۱/۵۲

بر اساس جدول ۷ حریم شعاع ثابت چاه با کلاس ۴۰۰۴۰۸ با کارآمدی (تسخیر) ۱۰۰٪ و تسخیر اضافی ۸۲/۱۶٪ دارای بهترین هم‌پوشانی و چاه با کلاس ۴۰۰۴۷۱ با کارآمدی ۱۹/۲۶٪ و عدم تسخیر ۸۰/۷۴٪ دارای کم‌ترین هم‌پوشانی با حریم حفاظتی مدل عددی می‌باشد. همچنین بر اساس جدول ۸ حریم محاسبه شده توسط روش تحلیلی Wyssling برای چاه با کلاس ۴۰۰۰۴۶ با کارآمدی ۱۰۰٪ و تسخیر اضافی ۸۶/۷۸٪ دارای بهترین هم‌پوشانی و چاه با کلاس ۴۰۰۴۷۱ با کارآمدی ۹/۳۵٪ و عدم تسخیر ۹۰/۶۵٪ دارای کم‌ترین هم‌پوشانی با حریم حفاظتی مدل عددی می‌باشد. بر اساس جدول ۹ حریم محاسبه شده توسط روش تحلیلی KLF برای چاه با کلاس ۴۰۰۰۴۶ با کارآمدی ۱۰۰٪ و تسخیر اضافی ۸۱/۵۲٪

دارای بهترین هم‌پوشانی و چاه با کلاس ۴۰۰۴۷۱ با کارآمدی ۲۳/۲۵٪، عدم تسخیر ۷۶/۷۵٪ و تسخیر اضافی ۲۷/۹۴٪ دارای کم‌ترین هم‌پوشانی با حریم حفاظتی مدل عددی می‌باشد. به همین ترتیب برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۵ سال و ۱۰ سال نیز برای چاه‌های منطقه مورد مطالعه درصد هم‌پوشانی و کارآمدی محاسبه گردید. در جداول ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نتایج مقادیر متوسط درصد‌های کارآمدی، عدم تسخیر و تسخیر اضافی حریم‌های محاسبه شده توسط روش‌های شعاع ثابت، تحلیلی Wyssling، KLF با حریم مدل عددی برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، یک سال، ۵ سال و ۱۰ سال ارایه شده است.

جدول ۱۰- مقادیر متوسط درصد‌های کارآمدی، عدم تسخیر و تسخیر اضافی حریم‌های شعاع ثابت

زمان حرکت	کارآمدی	عدم تسخیر	تسخیر اضافی
۱۸۰ روز	۶۲/۰۲	۳۷/۹۸	۲۵/۶۰
یک سال	۶۷/۱۲	۳۲/۸۸	۳۷/۷۱
۵ سال	۵۳/۷۷	۴۶/۲۳	۶۶/۷۲
۱۰ سال	۴۸/۹۵	۵۱/۰۵	۷۶/۸۸

جدول ۱۱- مقادیر متوسط درصد‌های کارآمدی، عدم تسخیر و تسخیر اضافی حریم‌های تحلیلی Wyssling

زمان حرکت	کارآمدی	عدم تسخیر	تسخیر اضافی
۱۸۰ روز	۶۲/۰۴	۳۷/۹۶	۴۳/۵۶
یک سال	۶۴/۳۵	۳۵/۶۵	۳۵/۶۴
۵ سال	۵۹/۸۱	۴۰/۱۹	۳۹/۲۷
۱۰ سال	۵۷/۸۶	۴۲/۱۴	۴۱/۸۷

جدول ۱۲- مقادیر متوسط درصد‌های کارآمدی، عدم تسخیر و تسخیر اضافی حریم‌های تحلیلی KLF

زمان حرکت	کارآمدی	عدم تسخیر	تسخیر اضافی
۱۸۰ روز	۵۹/۱۳	۴۰/۸۷	۳۱/۰۹
یک سال	۶۰/۰۳	۳۹/۹۷	۴۷/۰۲
۵ سال	۴۸/۵۶	۵۱/۴۴	۶۷/۸۲
۱۰ سال	۴۴/۸۰	۵۵/۲۰	۷۲/۷۴

عددی از نظر شکل ظاهری باریک و کشیده بوده و بخش قابل ملاحظه‌ای از فواصل جانبی حریم مدل عددی را پوشش نمی‌دهند. حریم حفاظتی بالادست محاسبه شده توسط روش‌های تحلیلی Wyssling و KLF همواره از حریم حفاظتی بالادست مدل عددی بیش‌تر می‌باشد. میزان متوسط اختلاف حریم بالادست روش تحلیلی Wyssling با حریم بالادست روش مدل عددی برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر ۳۵، ۹۹، ۴۹۰ و ۱۰۰۲ متر می‌باشد و برای حریم حفاظتی بالادست روش تحلیلی KLF در مقایسه با مدل عددی برای زمان‌های فوق به ترتیب برابر ۳۵، ۱۷۶، ۱۰۰۶ و ۲۳۱۵ متر می‌باشد.

بنابراین با افزایش زمان حرکت، از میزان انطباق حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط روش‌های تحلیلی Wyssling و KLF با مدل عددی کاسته می‌شود. همچنین بهترین هم‌پوشانی حریم روش‌های تحلیلی Wyssling و KLF با حریم عددی برای زمان حرکت یک سال با درصد کارآمدی ۶۴/۳۵٪ و ۶۰/۰۳٪ می‌باشد و با افزایش زمان حرکت از هم‌پوشانی آن‌ها با مدل عددی کاسته می‌شود. همچنین در تحقیق اسپرینگر و بایر با مقایسه سه مدل تحلیلی (CAPZONE/GWPATH)، نیمه تحلیلی (RESSQC/DREAM) و عددی (MODFLOW)، به این نتیجه رسیدند که حریم حفاظتی محاسبه شده توسط مدل‌های تحلیلی و نیمه تحلیلی به مراتب از حریم حفاظتی محاسبه شده توسط مدل عددی کوچک‌تر است (Springer and Bair., 1992). لیونگستون و همکاران در پژوهش مشابه به این نتیجه رسیدند که مدل‌های سه بعدی عددی از مدل‌های دوبعدی عددی و مدل‌های تحلیلی جهت ترسیم حریم کیفی دقیق‌تر است (Livingstone et al., 1995).

۳- به‌طور کلی روش مدل عددی مناسب‌ترین روش جهت تعیین حریم حفاظتی چاه به حساب می‌آید. با این وجود، در مقایسه با روش‌های شعاع ثابت محاسبه‌ای، تحلیلی Wyssling و KLF، این روش نیازمند تخصص و تجربه بالاتر و صرف زمان و هزینه 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 مدل مفهومی مدل عددی باید تخمین زده شود، روش‌های تحلیلی و شعاع ثابت محاسبه‌ای نیز همان دقت مدل‌های عددی را فراهم خواهند نمود. در مطالعه‌ای میلر و همکاران به این نتیجه رسیدند که در مناطقی که زمان، سرمایه و کادر فنی محدود است، روش شعاع ثابت محاسبه شده به عنوان نقطه شروع حفاظت از کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Miller et al., 2003).

بر اساس جدول ۱۰ بهترین هم‌پوشانی حریم شعاع ثابت با حریم مدل عددی برای زمان حرکت یک سال به ازای درصد کارآمدی، عدم تسخیر و تسخیر اضافی ۶۷/۱۲٪، ۳۲/۸۸٪ و ۳۷/۷۱٪ می‌باشد. همچنین مطابق جداول ۱۱ و ۱۲ بهترین هم‌پوشانی حریم روش‌های تحلیلی Wyssling و KLF با حریم عددی برای زمان حرکت یک سال می‌باشد و با افزایش زمان حرکت از هم‌پوشانی آن‌ها با مدل عددی کاسته می‌شود، به طوری که برای زمان حرکت ۱۰ سال میزان درصد کارآمدی روش‌های تحلیلی Wyssling و KLF به ترتیب برابر ۵۷/۸۶٪ و ۴۴/۸۰٪ می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور مقایسه حریم‌های حفاظتی محاسبه شده توسط سه روش شعاع ثابت محاسبه‌ای، تحلیلی Wyssling و KLF با حریم حفاظتی مدل عددی از داده‌های ۶ حلقه چاه آب شرب روستایی واقع در دشت بیرجند استفاده گردید و نتایج این پژوهش به شرح ذیل بیان می‌گردد.

۱- روش شعاع ثابت محاسبه‌ای هرچند روشی ساده بوده و به راحتی قابل اجرا است اما در این روش از جریان آب زیرزمینی و گرادیان هیدرولیکی آبخوان صرف‌نظر کرده و مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان نیز تأثیری در نتایج نخواهد داشت، به عبارتی این روش آبخوان را همگن و همسانگرد در نظر می‌گیرد، بنابراین حریم ترسیمی توسط این روش به شکل دایره می‌باشد. بر اساس نتایج این تحقیق فواصل حفاظتی محاسبه شده توسط روش شعاع ثابت همواره کوچک‌تر از فواصل حفاظتی بالادست محاسبه شده توسط مدل عددی می‌باشد و میزان متوسط اختلاف شعاع حریم‌های محاسبه شده توسط دو روش مدل عددی و شعاع ثابت محاسبه‌ای برای زمان‌های حرکت ۱۸۰ روز، ۱ سال، ۵ سال و ۱۰ سال به ترتیب برابر ۳۰، ۴۰، ۳۱۴ و ۷۱۱ متر می‌باشد. بنابراین با افزایش زمان حرکت، از میزان انطباق حریم‌های حفاظتی ترسیمی توسط روش شعاع ثابت محاسبه‌ای با مدل عددی کاسته می‌شود. همچنین بهترین هم‌پوشانی حریم شعاع ثابت با حریم مدل عددی با درصد کارآمدی (تسخیر) ۶۷/۱۲٪ برای زمان حرکت یک سال می‌باشد و با افزایش زمان حرکت درصد کارآمدی روش شعاع ثابت کاهش می‌باشد. دلخواهی و همکاران در تحقیقی مشابه به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمان حرکت از دقت روش‌های شعاع ثابت و تحلیلی نسبت به مدل عددی کاسته می‌شود و مدل عددی دقیق‌ترین روش جهت ترسیم حریم حفاظتی می‌باشد (دلخواهی و همکاران، ۱۳۹۲).

۲- حریم‌های ترسیمی توسط روش‌های تحلیلی Wyssling و KLF در مقایسه با حریم محاسباتی شعاع ثابت محاسبه‌ای و مدل

1 - Capcure Zone Module

2 - Ground-Water Flow Path Analysis

استفاده از نرم‌افزار PMWIN. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران.

همراز، ب. س.، اکبرپور، ا. و پوررضا بیلندی، م. ۱۳۹۴. تحلیل عدم قطعیت پارامتری مدل MODFOLW توسط روش GLUE (مطالعه موردی: دشت بیرجند). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۲، ۶: ۶۱-۷۹.

Bates, J.K and Evans, J.E. 1996. Evaluation of wellhead protection area delineation methods, applied to the municipal well field at Elmore. 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.

Frind, E.O and Mohammad, D.S. 2005. Delineation of three-dimensional well capture zone for complex multi-aquifer systems. Ground Water Journal. 40.6:586-598.

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

Livingstone, S., Franz, T and Guiger, N. 1995. Managing ground water resources using wellhead protection. Journal of the Geological Association of Canada. 22.4:121-128.

Miller, C., Chudek, P and Babcock, S. 2003. A comparison of wellhead protection area delineation methods for public drinking water systems in Whatcom County, Washington. Journal of the Environmental Health. 66.2:17-27.

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, 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, 11-13 July, Universidade do Minho, Guimaraes, Portugal.

Puchalski, G. 2009. Wellhead Protection Plan for the City of Barrett. Journal of Minnesota Department of Health. 24.3: 2-16.

Rahman, M and Shahid, S.H. 2008. Modeling Groundwater Flow for the Delineation of Wellhead Protection Area around a Water-well at Nachole of Bangladesh. Journal of Spatial Hydrology. 4.1:13-22.

Springer, A.E and Bair, E.S. 1992. Comparison of methods used to delineate capture zones of wells: Stratified-Drift Buried-Valley Aquifer. Groundwater Journal. 30.6:908-917.

Sadeghi Tabas, S., Samadi, S.Z., Akbarpour, A and

پیشنهادها

با توجه به اهمیت بالای محاسبه بهینه و دقیق حریم حفاظتی چاه‌های آب شرب و پیشگیری از آلودگی آب چاه، پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

- ۱- تحلیل عدم قطعیت در عوامل موثر بر حریم حفاظتی کیفی چاه
- ۲- بررسی و تحلیل اندرکنش چاه‌های برداشت مجاور و تاثیر بر حریم حفاظتی یکدیگر

منابع

اکبرپور، ا.، اعتباری، ب. و برزنونی، س. ۱۳۹۰. مدل‌سازی آب زیرزمینی در راستای تعیین حریم کیفی چاه‌های آب شرب (مطالعه موردی بیرجند). چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب.

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

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

دلخواهی، ب.، خدایی، ک. و اسدیان، ف. ۱۳۹۲. مقایسه روش‌های ترسیم حریم حفاظتی چاه (مطالعه موردی: چاه‌های شرب شهر همدان). مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۹، ۲: ۲۷-۴۱.

صادقی، ز.، اسماعیلی، ک. و کابلی، ع. ر. ۱۳۹۴. ارزیابی و مقایسه روش‌های تعیین حریم کیفی چاه با استفاده از مدل ریاضی (مطالعه موردی: آبخوان استان گلستان). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۹، ۲: ۳۳۵-۳۴۴.

عزیزی، م.، صیامی، م. و نصیری خراسانی، ن. ۱۳۹۲. بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی بر اثر انتقال شیرابه تولیدی در دفن‌گاه زباله با استفاده از مدل ریاضی تفاضلات محدود در محیط GMS (مطالعه موردی: سایت لندفیل شرق تگزاس، آمریکا). پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب.

فتحیان، ف. و دهقان، ز. ۱۳۹۰. مطالعه روش‌های محاسبه حریم منطقه آبد چاه‌های شرب و اقدامات مدیریتی حفاظت از آن‌ها. دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران.

مجرد، م.، رخسندهر، غ. ر. و امیری، ح. ۱۳۹۲. تعیین حریم کیفی ناحیه-ای و نقطه‌ای منابع آب زیرزمینی دشت زرقان در استان فارس با

- areas under conditions of uncertainty. The Proceedings of the second International CEMEPE and SECOTOX Conference, Mykonos, Greek.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1987. Guidance for Delineation of Wellhead Protection Areas, U.S. EPA, Office of Groundwater Protection, Washington, D.C.
- Wuolo, R.W., Dahlstrom, D.J and Fairbrother, M.D. 1995. Wellhead protection area delineation using the analytic element method of ground water modeling. *Groundwater Journal*. 33.1:71-83.
- Pourreza Bilondi, M. 2017. Sustainable groundwater modeling using single and multi-objective optimization algorithms. *Journal of Hydroinformatics*. 19.1:97-114.
- Stroble, R.O and Robillard, P.D. 2006. Comparison of several EPA-recommended US and German wellhead protection area delineation methods in agricultural settings. *Journal of the Water SA*. 32.4:507-517.
- Theodossiou, N and Latinopoulos, D. 2009. Economic aspects of the delineation of well head protection

Evaluation of Methods for Determining the Drinking Wellhead Protection Area Using Numerical Model (Case study: Birjand plain)

M. Azizi¹ and A. Shahidi^{2*}

Received: Nov.20, 2017

Accepted: Jun.09, 2018

Abstract

Determining the protective area of the well is one of the important parts of the groundwater protection policies in order to prevent the health and environmental hazards. In this research, while introducing calculated constant radius method, KLF and Wyssling analytical methods and numerical modeling were used as the most common methods for protective area of the well in order to compare these methods using data from 6 rings of rural drinking water in Birjand Plain. The results of the study show that the protective area plotted by the calculated constant radius method does not include a significant part of the protective space plotted by the numerical model in the upstream section of the well. In addition, boundaries plotted by Wyssling and KLF analytical methods are narrow and stretched in terms of appearance compared with the boundary of numerical model, and do not cover a significant portion of the numerical model lateral distances and the calculated upstream protective area is always wider than upstream protective area in the numerical model. The best overlapping of calculated constant radius and analytic Wyssling and KLF methods with numerical boundaries occurs with the efficiency percentage of respectively 67.12%, 64.35% and 60.03% for duration of one year. As the travel time increases, their overlapping with the numerical model is reduced. In general, the numerical model is the most accurate method for drawing the protection area of the well, but the use of simpler methods such as constant radius and analytical techniques will have acceptable accuracy in the absence of data, time, capital, and sufficient expertise.

Keywords: Birjand plain, Numerical Model, Wellhead protection area

1- PhD Student, Department. of Science and Water Engineering, University of Birjand

2- Associate Prof. seor., Department. of Science and Water Engineering, University of Birjand

(*- Corresponding Author Email: ashahidi@birjand.ac.ir)