تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال شانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹
Volume 16, No.1, Spring 2020 (IR-WRR)
۱-۱۶

تعیین حریم کیفی چاه‌های آب شرب با درنظر گرفتن پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان

محمدقدیر زمانی مقدم[۱]، علی مریدی[۲*] و جعفر یزدی[۳]

چکیده

در اغلب مناطق قسمت قابل ملاحظه‌ای از آب شرب به وسیله چاه‌ها و از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. منابع مورد استفاده برای تأمین آب شرب همواره در معرض تهدید آلاینده‌های مختلف می‌باشند. در این مقاله با استفاده از مدل‌های MODFLOW، WhAEM2000 و DRASTIC محدوده حریم کیفی چاه‌های شرب تعیین شده است. در این تحقیق ابتدا مدل مفهومی آبخوان دشت رودان توسط مدل MODFLOW ساخته شد و مقادیر تغذیه، هدایت هیدرولیکی و مقدار ضریب آبدهی ویژه کالیبره گردید. مدل پایدار برای یک سال آبی نرمال و همچنین مدل ناپایدار برای سه سال آبی ساخته شد که خطای مدل برای حالت ماندگار و غیر ماندگار به ترتیب برابر با ۱/۴۹ و ۲/۳۲ به دست آمد. در ادامه از نتایج بدست آمده در محیط WhAEM2000 استفاده شد و حریم کیفی چاه‌ها به دو روش شعاع ثابت محاسبه‌شده و روش تحلیلی محاسبه گردید. سپس با استفاده از روش DRASTIC میزان آسیب‌پذیری آبخوان در محدوده‌های حریم کیفی چاه‌های شرب شناسایی و مبنایی برای تعیین حریم در محدوده دشت رودان در استان هرمزگان گردید. نتایج نشان داد که عمده چاه‌های شرب در محدوده با آسیب‌پذیری بالا با کاربری اراضی کشاورزی بوده که با توجه به تعیین حریم کیفی چاه شرب در سال‌های مختلف باید حریم کیفی بزرگتری (ده ساله) برای چاه‌های این مناطق در نظر گرفته شود؛ زیرا اعمال حریم کوچک، خطر آلودگی آب چاه را بالا می‌برد. همچنین برای مناطق با آسیب پذیری کمتر و کاربری‌های اراضی دیگر نیز می‌توان حریم حفاظتی کوچک‌تری اعمال کرد؛ زیرا اعمال حریم بزرگتر در این مناطق هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی زیادی را به دنبال خواهد داشت. برمبنای مطالعات قبلی انجام شده، عمده چالش استفاده از مدل WhAEM2000 برای تعیین حریم کیفی چاه‌های شرب تعیین مقادیر دقیق مشخصات مربوط به آبخوان و سال مبنای قضاوت تعیین حریم کیفی بوده است. در این مقاله با استفاده از مدل کالیبره شده آب زیرزمینی در نرم‌افزار GMS و همچنین تعیین آسیب‌پذیری آبخوان در محدوده حریم کیفی چاه‌ها با استفاده از مدل DRASTIC سعی در تعیین دقیق‌تر حریم کیفی شده است. با توجه به مطالب بیان شده سه ناحیه حفاظتی فوری (۲ ساله)، اجباری (۵ ساله) و حمایتی (۱۰ ساله) برای چاه‌های شرب منطقه تعیین گردید.

کلمات کلیدی: حریم کیفی، DRASTIC، WhAEM2000، MODFLOW، آسیب‌پذیری آبخوان، GMS.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۵/۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۲۸

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

Determining the Groundwater Quality Protection Zone by Considering the Vulnerability of Aquifer

M. Ghadir Zamani [1] , A. Moridi[2], and J. Yazdi[3]*

Abstract

In most areas, most of the drinking water supplies from groundwater resources, is constantly threatened by various pollutants. In this paper, the groundwater quality protection zone is defined using MODFLOW, WhAEM2000 and DRASTIC models. In this research at the beginning, the conceptual model of Rudan plain aquifer has been made by MODFLOW model and the values of recharge, Hydraulic conductivity and value of Specific yield coefficient has been calibrated. Steady model for 1389-90 blue year and also unsteady model for 1389-91 blue years was made as the root mean square error for steady model was equal to 1.49 and for unsteady model 2.32. Then, the groundwater quality protection zone is determined by using WhAEM2000 model in both constant radius and analytical methods. Finally, the vulnerability level of the aquifer was identified and considered for determining the protection zone area. Results showed that most of the wells are located in the highly vulnerable zone with agricultural land use. So, Because of the high risk of groundwater pollution, extra travel time for groundwater (about 10 years) must be considered for determination of protection zone. Also, for less vulnerable areas and other land use areas, a smaller protection area can be applied, since the application of greater zone in these areas will lead to a lot of social and economic costs. Based on previous studies, the main challenge for using the WhAEM2000 model to determine the protection zone of water quality for drinking wells is to determine the precise values of aquifer specifications and the basis for judging the travel time of pollution in the aquifer. In this paper, using a calibrated groundwater model in GMS software, and also determining the vulnerability of aquifer using the DRASTIC model, attempts have been made to determine more precisely the protection zone. Finally, according to the stated points, three immediate protection zones, mandatory and protective zones were determined for drinking water wells.

Keywords: DRASTIC, WhAEM2000, MODFLOW, Aquifer Vulnerability, GMS.

Received: July 29, 2018
Accepted: March 19, 2019

1- M.Sc. Student, Civil, Water and Environmental Faculty, Shahid Beheshti University.
2- Assistant Professor, Civil, Water and Environmental Faculty, Shahid Beheshti University. Email: a_moridi@sbu.ac.ir
3- Assistant Professor, Civil, Water and Environmental Faculty, Shahid Beheshti University.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

در طی سال‌های اخیر، رشد روزافزون جمعیت و افزایش نیاز آبی از یک‌سو و توسعه فعالیت‌های بشری (صنایع، کشاورزی) کمیت و کیفیت منابع آب را مورد تهدید قرار داده و عملا مسأله کم آبی و بحران آب را به وجود آورده است. از این رو مصرف بهینه و حفظ و صیانت از کیفیت منابع آب موجود در زمره اقدامات اساسی جهت مقابله با پدیده کم آبی محسوب می‌گردد. با حفاظت کیفی منابع آب نه تنها کیفیت آب برای نوع استفاده‌ای که از آن به عمل می‌آید حفظ می‌شود بلکه از میزان هزینه‌های تصفیه آب نیز کاسته می‌شود. امروزه این امر بر همگان روشن شده است که بهترین راه حفاظت کیفی منابع آب، جلوگیری از آلوده‌سازی آن‌ها می‌باشد. تعیین حریم‌های کیفی برای منابع آب یکی از رویکردهای مطرح در این زمینه است (Karimi et al., 2010).

آب زیرزمینی منبع تأمین کننده آب شرب در بسیاری از نقاط کشور می‌باشد. وجود منابع آلاینده متعدد در کنار چاه‌های شرب و عدم مدیریت صحیح آن‌ها می‌تواند تغییرات نامطلوبی در کیفیت آب ایجاد نماید (Badv and Mollaie, 2005). امروزه بخش قابل توجهی از مصارف آب کشور به خصوص در بخش شرب، توسط منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود، که به طور عمده از آبخوان‌های آزاد تأمین می‌شوند. در صورت آلوده شدن آب زیرزمینی، رفع آلودگی آن بسیار پرهزینه و فرآیندی طولانی مدت می‌باشد. به علاوه تأثیرات آلودگی آب زیرزمینی تنها مختص چاه‌های تأمین آب و آبخوان نبوده و حرکت آب زیرزمینی به سمت دریاچه‌ها و رودخانه‌ها باعث آلودگی منابع آب سطحی نیز می‌شود که عواقب زیست محیطی خطرناکی را به دنبال دارد (Ataie Ashtiani, 2010).

ایران کشوری با بارندگی کمتر از یک سوم بارندگی جهان، جزو کشورهایی محسوب می‌شود که در آن آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی می‌باشد. از این‌رو علاوه بر تعیین حریم حفاظتی چاه، حریم حفاظتی آبخوان نیز مطرح بوده و در اکثر مناطق دنیا از آسیب‌پذیری آبخوان بدین منظور استفاده می‌شود. در بسیاری از کشورها، تعیین حریم حفاظتی در دو یا سه سطح در اطراف سیستم‌های تامین آب شرب الزامی است. همچنین، لازمه برآورد حریم حفاظتی، محاسبه آسیب‌پذیری می‌باشد. به عبارت دیگر، در ابتدا باید آسیب‌پذیری یک آبخوان تهیه گردد تا سپس با استفاده از تعیین آلودگی پخش شده در منطقه بر اساس نوع کاربری، حریم حفاظتی تعیین شود (Sabet Raftar, 2013). در حریم حفاظتی منابع آب حداکثر سه نوع ناحیه حفاظتی از منبع تعریف شده است که تحت عنوان حریم حفاظت بهداشتی چاه (ناحیه ۱ یا ناحیه حفاظت فوری)، ناحیه حفاظت داخلی (ناحیه ۲ یا ناحیه حفاظت اجباری) و ناحیه حفاظت خارجی (ناحیه ۳ یا حفاظت حمایتی) به طور متوالی پیرامون چاه پمپاژ در نظر گرفته می‌شوند.

حفاظت کیفی از منابع آب زیرزمینی شهرها که برای تأمین آب شرب استحصالی از چاه‌ها نقش دارند، امروزه از مسأله‌ها و دغدغه‌های فکری متولیان تأمین و توزیع آب شرب یعنی سازمان‌های آب و فاضلاب کشور محسوب می‌شود. بیشتر آلاینده‌های آب زیرزمینی بر اثر فعالیت‌های انسان در سطح زمین و پس از عبور از منطقه غیراشباع، وارد سیستم آبخوان می‌گردند. راه دیگر ورود آلاینده‌ها به داخل آبخوان، نفوذ از رسوبات بستر رودخانه، دریاچه‌ها، مخازن آب (مانند سدها) و زمین‌های مرطوب می‌باشند. از آنجا که بیشتر آلاینده‌ها به طور مستقیم و 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. در این راستا محاسبه بهینه و دقیق حریم‌های حفاظتی با استفاده از مبانی علمی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا محاسبه و اعمال حریم کوچکتر خطر آلودگی آب را بالا برده به طوری که آلاینده‌ها ممکن است نهایتاً از طریق مناطق حفاظت نشده وارد منبع آب شوند و همچنین برعکس اقدامات پیشگیرانه بیش از حد ممکن است باعث ایجاد محدودیت‌های غیر ضروری در مناطقی شود که تأمین‌کننده آب برای چاه مورد نظر نمی‌باشد و در نتیجه این کار اتلاف سرمایه را به دنبال خواهد داشت (Abarashi et al., 2013).

حفاظت کیفی از منابع آب زیرزمینی که از طریق چاه‌ها استحصال شده و در شهرها به مصرف شرب می‌رسد، از نظر بهداشتی برای حفظ سلامت شهروندان از اهمیت خاصی برخوردار است. مواد آلاینده رها شده در سطح و یا زیر زمین در صورت واقع شدن در داخل ناحیه‌ای خاص در اطراف چاه، پس از طی مسافتی در یک مدت زمان معین، می‌توانند به داخل چاه راه یابند (Badv, 2005).

به منظور مشخص کردن محدوده تغذیه‌کننده چاه‌های آب شرب شهر استروگن بای در ویسکانسین آمریکا، آب‌های زیرزمینی این منطقه را با نرم‌افزار MODFLOW شبیه‌سازی کردند. پس از مدل‌سازی با دو حالت ماندگار و غیرماندگار، به این نتیجه رسیدند که برای منطقه مذکور اجرای مدل در حالت غیرماندگار، بازتاب بهتری از رفتار آبخوان ارائه می‌کند. همچنین، از نتایج اجرای مدل با استفاده از مدل MODPATH مشخص شد که ناحیه تغذیه کننده چاه‌ها در فاصله

۱۰ کیلومتری شمال شهر تا ۷ کیلومتری جنوب شهر قرار دارد و زمان پیمایش از نواحی تغذیه تا همه چاه‌ها معمولاً کمتر از یک سال است که نشان از آن است چاه‌های آب شرب در معرض خطر آلودگی قرار دارند (Todd et al., 2001). Rahman and shahid (2005) از مدل عددی جهت ترسیم حریم حفاظتی هفت حلقه چاه در نزدیکی شهر داکا در کشور بنگلادش استفاده نمودند. در این تحقیق اثر شرایط مرزی آب زیرزمینی بر حـــریم حفاظتی بررسی گـردیده است. Moniante and Ferrera (2005) ضمن استفاده از روش‌های تحلیلی، جهت ترسیم حریم حفاظتی چاه‌های شرب دهکده‌ای در کشور پرتقال، از روش‌های گرافیکی و آماری جهت بررسی اثرات تغذیه سطحی آبخوان و میزان برداشت از چاه بر شکل حریم حفاظتی استفاده نمودند و در نهایت رابطه مستقیم این دو پارامتر را با اندازه حریم حفاظتی نتیجه گرفتند. Alizade et al. (2009) برای تعیین حریم بیولوژیک چاه‌های آب آشامیدنی شهر مشهد، از روش محاسباتی و مدلی که کینزل باخ در سال ۱۹۸۶ ارائه نمود استفاده نمودند و خطوط هم‌میزان را برابر با ۵۰ روز برای تعیین حریم کیفی به روش تحلیلی و برای هر چاه رسم نمودند. بدین ترتیب هر ذره آلودگی که در خارج خطوط قرار گرفته باشد، از بین رفته و دیگر خطر آلودگی میکروبی برای چاه آب آشامیدنی وجود نخواهد داشت. در مطالعه دیگری در نیوجرسی با مقایسه نتایج مدل تحلیلی با مدل عددی مشاهده کردند حریم‌های حاصل از روش تحلیلی بزرگ‌تر و محافظه‌کارانه‌تر از روش عددی MODFLOW می‌باشد. دلیل این امر در این مطالعه در نظر گرفتن جزییات خصوصیات آبخوان در روش عددی مطرح شد.

در مطالعه Akbarpur et al. (2011) حریم حفاظتی چاه‌های آب شرب شهر بیرجند با در نظر گرفتن وضعیت زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئوشیمی آبخوان به کمک نرم‌افزار WhAEM2000 بر اساس روش‌های (شعاع ثابت محاسبه شده) و (تحلیلی) برآورد شد و نتایج به صورت نقشه‌هایی ارائه گردید. در نهایت بیان شد مقادیر شعاع حفاظتی تابعی از خصوصیات هیدروژئولوژیک، میزان پمپاژ و زمان پایداری آلاینده است. همچنین مسافتی که آلوده‌کننده طی می‌کند به عواملی نظیر؛ کیفیت آلوده‌کننده، کیفیت زمین‌شناسی محل، سطح آب زیرزمینی، میزان نفوذ آلوده‌کننده‌ها در زمین، شرایط و کیفیت سطح زمین، میزان جریان آب‌های زیرزمینی و میزان پمپاژ آب‌های زیرزمینی وابسته است. Siarkos and Latinopolous (2012) با هدف تعیین حفاظتی چاه‌های شرب آبخوان موندیای یونان اقدام به استفاده از نرم‌افزار GMS نمودند. برای این منظور پس از تهیه مدل عددی تفاضل محدود MODFLOW برای سال ۲۰۰۱ در حالت ماندگار و کالیبراسیون مدل انجام شده، مناطق حفاظتی چاه‌های شرب با به کارگیری مدل MODPATH تعیین نمودند. Rezaie et al. (2013) در تحقیقی از روش منطق فازی برای جلوگیری از ورود آلودگی به آبخوان حوضه زاینده‌رود انجام گرفت سه مورد بحرانی حداقل، حداکثر و مقادیر میانگین برای پارامتر تغذیه آبخوان را در نظر گرفتند. بدین ترتیب نتایج نشان داد که مناطق غربی حوضه آبخوان به طور کلی دارای پتانسیل آلودگی بالایی بوده و به دنبال آن مناطق واقع در شرق این مشکل را دارا خواهند بود. همچنین بخش‌های مرکزی منطقه مطالعه پتانسیل آلودگی کمتری دارند. در ادامه نیز دو تحلیل حساسیت را برای نشان دادن اهمیت هر مقدار تغذیه در محاسبه شاخص آسیب‌پذیری آبخوان را انجام دادند. Khodabakhshi et al. (2015) آسیب‌پذیری آبخوان دشت سفیددشت در استان چهارمحال و بختیاری را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در این تحقیق از روش شاخص کیفی آبهای زیرزمینی (CQI) برای دستیابی به کیفیت آبخوان و محدوده‌های مختلف آن از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، شاخص آسیب‌پذیری آبخوان سفید رود را به دو محدوده با آسیب‌پذیری کم و متوسط تقسیم‌بندی نمودند. نتایج نشان داد که کیفیت آب آبخوان این دشت دارای کیفیت مناسب است. اگرچه با بررسی دقیق‌تر مشخص شد که از شمال به جنوب و جنوب غربی آبخوان کیفیت آب در حال بدتر شدن است و تمرکز بیشتر یون‌ها در جنوب غربی آبخوان بود. با مقایسه نتایج آسیب‌پذیری آبخوان با شاخص (CQI) مشخص شد که نتایج ضعیفی میان این پارامترها وجود دارد. در کارهای مشابه Soltani et al. (2018) و Niknam et al. (2007) با استفاده از مدل DRASTIC آسیب‌پذیری آبخوان را ارزیابی کردند.

در مطالعه‌ای در آبخوان استان گلستان به منظور مقایسه عملکرد روش‌های مختلف در منطقه مذکور، از نرم‌افزار WhAEM2000 با به کارگیری روش معادلات جریان آب زیرزمینی در شرایط جریان یکنواخت و روش شعاع ثابت، استفاده شد. نتایج نشان داد میزان شیب هیدرولیکی و هدایت هیدرولیکی نقش به‌سزایی در محاسبه حریم کیفی دارد؛ به طوری که زیاد بودن شیب هیدرولیکی و هدایت هیدرولیکی در مناطق مخروط افکنه، باعث شده است حریم کیفی محاسبه شده از طریق روش شعاع ثابت محاسبه شده و روش شکل‌های تغییرپذیر ساده شـــده با خطای زیادی همراه شود (Sadeghi et al., 2015). Rezaie et al. (2017) در پژوهشی که بر روی محدوده زاینده‌رود انجام گرفت یک روش جدید را که ترکیبی از شبکه عصبی خود سازمان‌ده (SOM) و مدل DRASTIC سنتی است ارائه دادند. ایشان در این مقاله اضافه نمودند که روش DRASTIC سنتی حاوی مجموعی از تمامی اثرات منفی عوامل مختلف آسیب‌پذیری است؛ در حالی که روش ترکیبی پیشنهاد شده قادر به طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی است و رابطه واقعی موجود میان پارامترهای DRASTIC را به عنوان ورودی مدل و کلاس

آسیب‌پذیری را به عنوان خروجی مدل ترکیبی در نظر گرفتند. روش ترکیبی SOM-DRASTIC قسمت‌های شمالی منطقه مورد مطالعه را به‌عنوان آسیب‌پذیرترین محدوده با ساختار شدیداً شکست خورده تشخیص داد، در حالی که روش DRASTIC سنتی بخش‌های غربی محدوده را به عنوان محدوده با استعداد آسیب‌پذیری شدیدتر معرفی کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند توسط مدیران و تصمیم‌گیرندگان به عنوان ابزار قوی جایگزینی برای طبقه‌بندی مبتنی بر آسیب‌پذیری و برنامه‌ریزی استفاده از زمین گردد. Abedi Koupai et al. (2017) نرم‌افزار WhAEM2000 در مقایسه با مدل‌های موجود حریم دقیق‌تری را تعیین می‌کند؛ زیرا این مدل از خصوصیات ذاتی آبخوان و اطلاعات ورودی زیادی از جمله توپوگرافی، مرز آبخوان، چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های آب شرب، محدوده‌های شهری، تراز آب زیرزمینی، ضخامت آبرفت و آبخوان، عمق سنگ کف، قابلیت انتقال سفره آب زیرزمینی و میزان تخلخل آبخوان در مقایسه با سایر مدل‌های موجود که شامل تعداد کمتری از داده‌های ورودی است، استفاده می‌کند. با وجود این مزیت شایان توجه، مدل WhAEM200 تأثیر کاربری اراضی در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است. با توجه به اینکه کاربری اراضی از ویژگی‌های متغیر و پویای یک منطقه است که وابسته به زمان است و هر زمان احتمال تغییر آن وجود دارد پیشنهاد می‌گردد با حفاظت بهتر و بیشتر از منابع آب شرب تعیین حریم با توجه به نقشه آسیب‌پذیری منطقه انجام شود و پایش آن در مقیاس زمانی کوتاه مدت، صورت پذیرد.

در تحقیقات گذشته از مدل WhAEM200 برای تعیین حریم کیفی چاه‌های آب شرب استفاده شده است. ولیکن در تمامی آنها دو چالش و سؤال اصلی در رابطه با استفاده از این مدل وجود دارد: الف) مقادیر دقیق مربوط به مشخصات آبخوان و مورد استفاده در مدل WhAEM2000 چگونه برآورد شده است؟ ب) برای تعیین شعاع حریم کیفی چه سالی مبنای قضاوت قرار گرفته است؟

در این مطالعه با استفاده از مدل کالیبره شده MODFLOW به حل مسأله اول و با استفاده از مدل DRASTIC مسأله دوم حل شده است که به صورت جزیی‌تر می‌توان گفت در این مطالعه ابتدا داده‌های مربوط به محدوده مورد نظر جمع‌آوری شد و به کمک آنها مدل DRASTIC و نقشه کاربری اراضی آبخوان بدست آورده شد. سپس با استفاده از اطلاعات پایه (تراز مشاهده‌ای چاه‌های شرب، توپوگرافی منطقه، تراز کف بستر و اطلاعات اولیه) مدل GMS آبخوان ساخته شد و کالیبره گردید. در ادامه با استفاده از مقادیر اولیه و کالیبره شده (ضریب هدایت هیدرولیکی، تغذیه و مقدار آبدهی ویژه) در مدل کالیبره شده حریم‌کیفی آبخوان به روش‌های شعاع ثابت محاسبه شده و تحلیلی برای سال‌های مختلف تعیین شد. با ترکیب نقشه کاربری اراضی و نیز نقشه آسیب‌پذیری آبخوان مشخص شد که چاه‌های شرب در چه محدوده‌ای از آبخوان و با چه ویژگی‌هایی می‌باشند. در ادامه با توجه به آنکه اکثر چاه‌های شرب در محدوده کشاورزی و با آسیب‌پذیری بالا می‌باشند اقدام به راهکارهای حفاظتی برای این چاه‌ها صورت گرفته است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مطالعه موردی

محدوده مطالعاتی رودان در نواحی مرکزی حوضه آبریز رودخانه‌های بین بندرعباس تا سدیج قرار دارد. این محدوده مطالعاتی بین طول‌های جغرافیایی ۵۷ درجه تا ۵۷ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی، و عرض‌های جغرافیایی ۲۷ درجه و ۱۶ دقیقه و ۲۷ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی که نیمه مرکزی و غربی این محدوده در شرق استان هرمزگان و نیمه شرقی و شمال شرقی آن در جنوب شرق استان کرمان واقع شده است. مساحت محدوده مطالعاتی رودان برابر با ۷۹۹/۷ کیلومتر مربع بوده که در حدود ۵۷۳/۲۲ کیلومتر مربع آن را نواحی کوهستانی و مابقی آن (حدود ۲۲۶/۴۸ کیلومتر مربع) را نواحی دشتی تشکیل می‌دهند. میزان متوسط بارش سالانه ارتفاعات و دشت به ترتیب برابر با ۲۶۸/۹ و ۲۶۳/۸ میلیمتر در سال برآورده شده است. همچنین میزان آبدهی این محدوده برابر با ۰/۹۳ مترمکعب در ثانیه معادل ۲۹/۳۳ میلیون مترمکعب محاسبه گردید که همین مقدار به عنوان آبدهی محدوده مطالعاتی در نظر گرفته می‌شود. اقلیم این منطقه گرم و خشک است و زمستانی معتدل و تابستانی گرم دارد. این دشت به علت طبیعت خشک و تبخیر زیاد با محدودیت منابع آبی رو به رو است. کشاورزی و باغداری، مهمترین فعالیت اقتصادی محدوده دشت رودان را تشکیل می‌دهد که بیشتر به روش سنتی انجام می‌گیرد و مهمترین محصولات آن، مرکبات و خرما می‌باشد. میزان کل سطح-زیرکشت این منطقه ۱۳۶۹۹ هکتار شامل ۱۲۵۷۳ هکتار باغ و ۱۰۹۶ هکتار زمین‌های زراعی می‌باشد. در این محدوده ۱۶۰۴ چاه بهره‌برداری وجود دارد که ۱۵ عدد از آنها شرب بوده و در حال بهره‌برداری هستند. که در شکل زیر محدوده مورد مطالعاتی با جزییات کاربری آورده شده است (شکل ۱).

۲-۲- رویکرد مطالعه

شکل ۲ گام‌های مختلف تعیین حریم کیفی چاه‌ها را نشان می‌دهد. گام اول تعیین حریم، بدست آوردن مشخصات هیدرولیکی آبخوان است که با استفاده از مدل کالیبره شده آب زیرزمینی تعیین می‌گردد. داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی در دو قالب هیدرولوژیکی جای

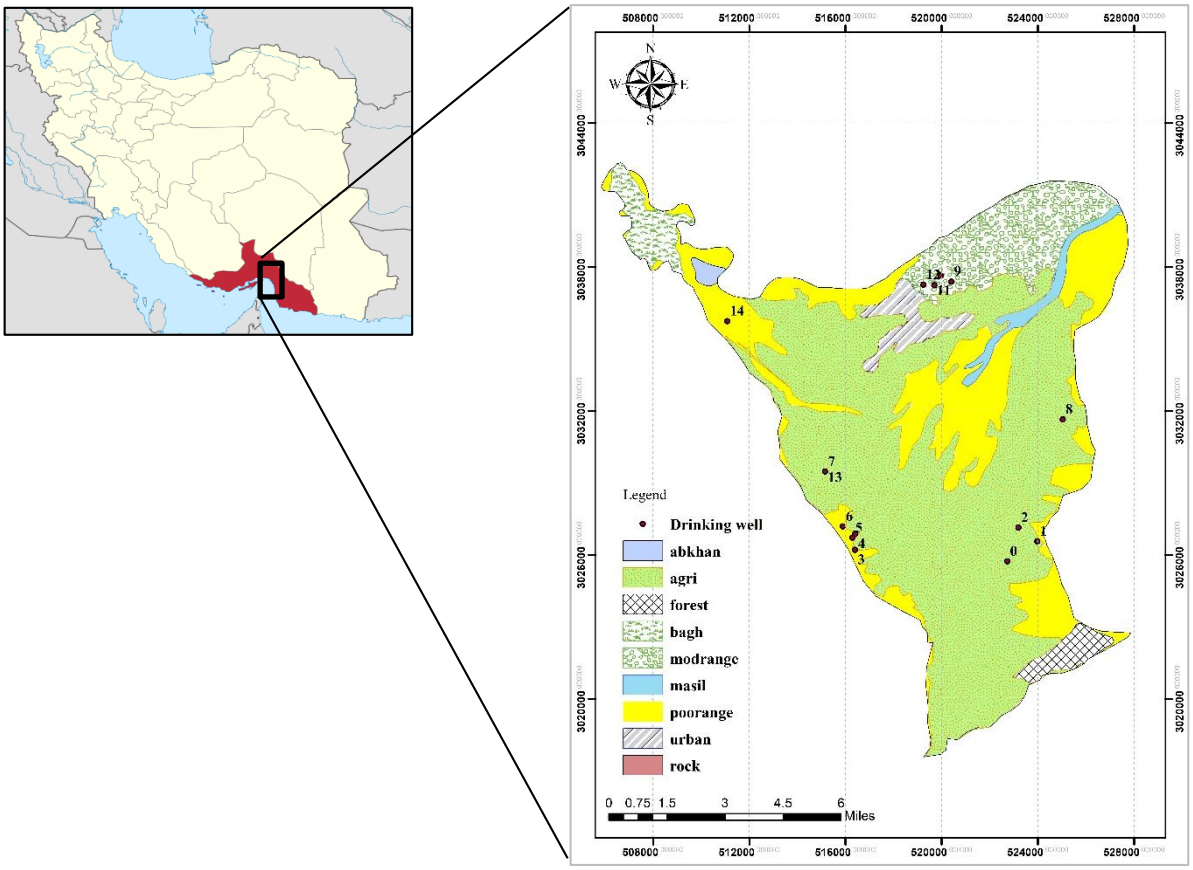

Fig. 1- Rudan plain land use and drinking water supply wells location

شکل ۱- نقشه کاربری اراضی دشت رودان و موقعیت چاه‌های تامین آب شرب

می‌گیرند. برای مدل‌سازی آبخوان دشت رودان، نقشه زمین‌شناسی محدوده، اطلاعات مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای، نقشه توپوگرافی، نقشه کف‌بستر، اطلاعات مربوط به سطح آب‌های زیرزمینی، اطلاعات مربوط به قابلیت انتقال چاه‌های اکتشافی، تغییرات زمانی و مکانی نرخ تبخیر و تعرق، میزان بارندگی، میزان پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری و تخلیه طبیعی زیرزمینی آبخوان جهت شناخت چارچوب هیدرولوژیکی سیستم با مراجعه به وزارت نیرو جمع‌آوری شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها از سازمان مربوطه و در گام دوم مدل مفهومی آبخوان با استفاده از نقشه‌های مورد استفاده از قبیل توپوگرافی، کف بستر، تراز آب زیرزمینی و سایر داده‌ها ساخته شد. سپس، در گام سوم مدل در حالت پایدار و برای یک دوره متوسط یک ساله ۱۳۸۹ که نماینده سال آبی نرمال محسوب می‌شود و بیانگر وضعیتی نرمال در بلند مدت می‌باشد؛ کالیبره گردید که در این فاز مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان بدست آورده شد. در گام چهارم مدل در حالت ناپایدار ساخته شد و مقادیر آبدهی ویژه و نیز تغذیه آبخوان برای یک دوره سه ساله ۱۳۹۱-۱۳۸۹ کالیبره شد. سپس، در گام پنجم با استفاده از نقشه کاربری اراضی محدوده مورد نظر و نیز نقشه آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از اطلاعات موجود اقدام به تعیین حریم کیفی حفاظتی چاه‌های آب شرب در محدوده‌های با آسیب‌پذیری متفاوت با کاربری‌های مختلف نمودیم که در بخش نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۳- مدل شبیه‌سازی آبخوان

نسخه اصلی مدل MODFLOW توسط McDonald and Harbough (1988) در USGS تهیه و ارائه گردیده است. این نرم‌افزار با زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده است و معادلات دیفرانسیلی جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل را بر پایه روش تفاضل‌های محدود حل می‌نماید. فرضیات موجود در مدل MODFLOW شامل چهار شرط: ۱) محیط آبخوان کاملاً اشباع است، ۲) جریان در محیط متخلخل از قانون دارسی تبعیت می‌کند، ۳) چگالی آب زیرزمینی در زمان و مکان ثابت است، ۴) جهت‌های اصلی هدایت هیدرولیکی افقی و ضریب آبگذری ثابت است.

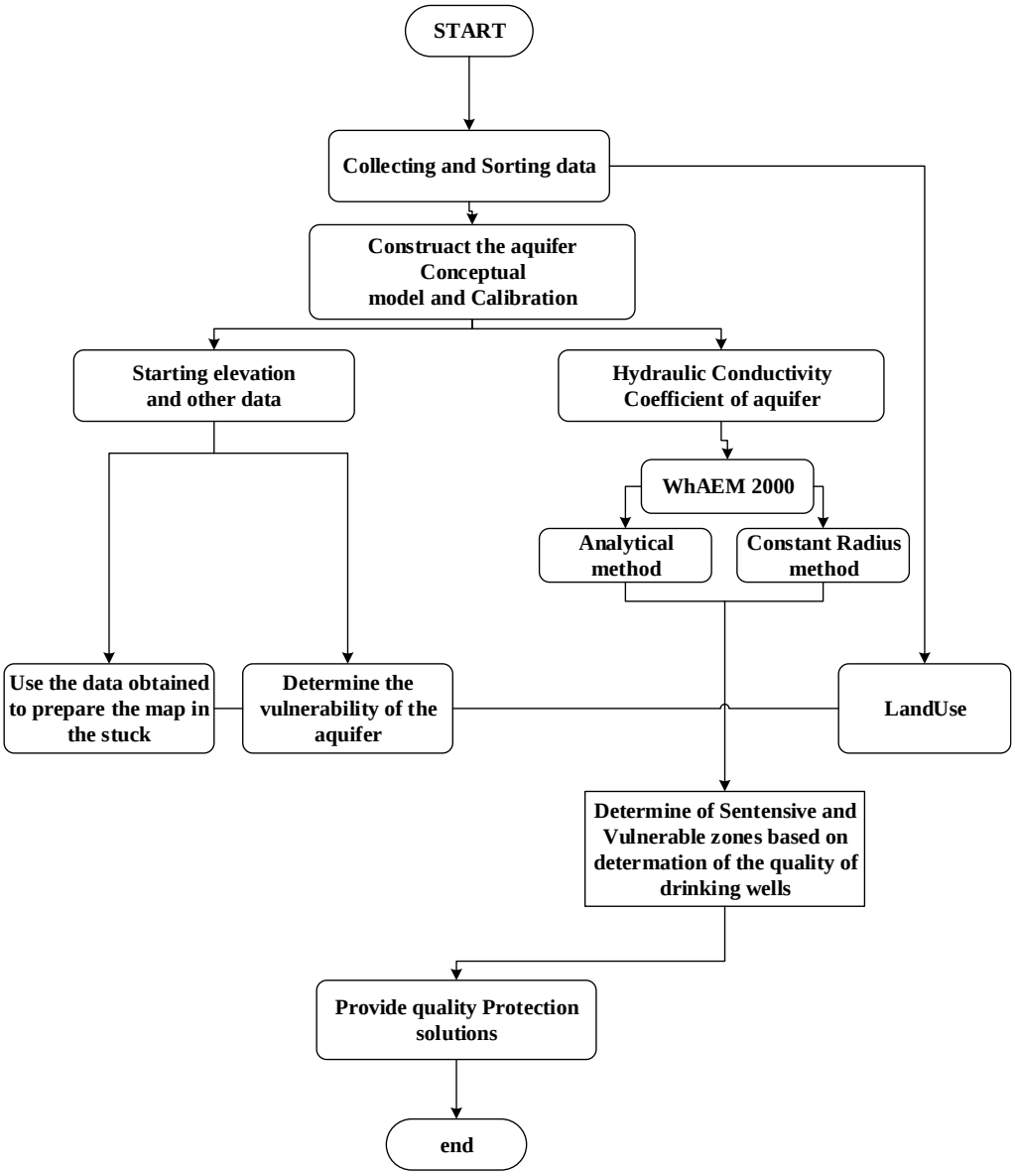

Fig. 2- Study approach

شکل ۲- رویکرد مطالعه

MODFLOW قادر به شبیه‌سازی محدوده وسیعی از فرآیندها و جنبه‌های هیدروژئولوژیکی از قبیل موازنه آب بین رودخانه و آبخوان، نفوذ ناشی از بارندگی و آبیاری، تبخیر و تعرق، استخراج یا تزریق توسط چاه، شرایط عمومی هد هیدرولیکی، تخلیه آبخوان از طریق چشمه و زهکش می‌باشد. همچنین جریان‌های ماندگار و غیرماندگار، آبخوان‌های آزاد و تحت فشار و سایر انواع آبخوان‌ها به کمک آن قابل شبیه‌سازی هستند. جهت حل معادلات جریان در محیط متخلخل، محدوده آبخوان در MODFLOW در جهات مختلف به صورت مستطیلی گسسته‌سازی می‌شود. در MODFLOW معادلات جریان به چهار روش عددی SIP[1]، SOR[2]، SSOR[3] و PCG[4] قابل حل هستند. معادلات توصیف کننده جریان سه بعدی آب زیرزمینی با فرض ثابت بودن چگالی، در آبخوان‌های آزاد مطابق رابطه ۱ می‌باشد که این رابطه با تغییر ضریب آبدهی ویژه به ضریب ذخیره آبخوان (S_s) برای آبخوان تحت فشار قابل کاربرد خواهد بود:

(۱)

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx}h\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial x}(K_{yy}h\frac{\partial h}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}h\frac{\partial h}{\partial z})+q_s=S_{ya}\frac{\partial h}{\partial t}$$

در روابط بالا، K_{xx}، K_{yy} و K_{zz} مولفه‌های ضریب آبگذری در سه جهت x، y و z؛ h = ارتفاع عمودی سطح ایستابی یا ارتفاع پیزومتری؛ q_s

= ترم تغذیه یا زهکش؛ S_{ya} = آبدهی ویژه ظاهری؛ t = زمان می‌باشد. معادلات بالا به ترتیب معادلات دیفرانسیل جزئی خطی و غیرخطی می‌باشند که جواب‌های آنها، توزیع زمانی و فضایی ارتفاع سطح آب را در آبخوان ناهمگن و ناهمسان نشان می‌دهد (USGS, 2000).

۲-۴- مدل تعیین حریم کیفی

مدل WhAEM2000 مدلی است جهت تعیین حریم حفاظتی چاه‌ها[۵] و برنامه‌ریزی جهت برآورد و تخمین منابع آب[۶] که توسط سازمان محیط زیست ایالات متحده آمریکا به منظور حفظ و حراست از منابع آب زیرزمینی و تامین آب آشامیدنی با کیفیتی مطلوب، تهیه و تدوین شد. این مدل بر مبنای روش تحلیلی آب‌های زیرزمینی را مدل کرده و حریم حفاظتی اطراف چاه، چشمه و حتی قنات را محاسبه می‌کند. مدل WhAEM2000 بر اساس مدل‌سازی قطعی ریاضی تهیه شده است. لایه‌های اطلاعاتی که برای حل معادلات جریان آب زیرزمینی در حالت جریان یکنواخت در مدل WhAEM2000 مورد نیاز می‌باشند همگی در محیط نرم‌افزار GIS تهیه می‌شود. این لایه‌ها شامل لایه توپوگرافی، مرز آبخوان، چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های آب شرب، محدوده‌های شهری، تراز آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، عمق سنگ کف، میزان هدایت هیدرولیکی و در نهایت میزان تخلخل آبخوان می‌باشند. سپس این لایه‌ها وارد محیط نرم‌افزار WhAEM2000 شده و مدل جریان آب زیرزمینی برای چاه‌های آب شرب تهیه می‌شود. بدین ترتیب که ابتدا مدل با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی واسنجی شده و سپس هر چاه شرب با یک مختصات و نقطه‌ای مشخص می‌گردد و مشخصات کلی آبخوان از جمله تراز سنگ کف، هدایت هیدرولیکی، ضخامت آبخوان و تخلخل در نقطه موردنظر به نرم‌افزار معرفی می‌شود.

۲-۴-۱- روش‌های تعیین حریم کیفی

- روش شعاع ثابت محاسبه شده[۷]

در این روش بر مبنای معیار گذر زمان تعیین حریم کیفی چاه تعیین می‌شود. در این روش برای هر زمان گذر ویژه یک مرز دایره‌ای شکل حول هر حلقه چاه رسم می‌گردد و برای محاسبه شعاع دایره از معادله (۳) استفاده می‌گردد. از مزایای این روش می‌توان به سادگی کاربرد، هزینه کم و تا حدودی عدم نیاز آن به تکنسین‌های ماهر است. از معایب این روش نیز باید اذعان کرد که در مناطقی که از نظر زمین‌شناسی پیچیده‌اند و مرزهای هیدرولوژیک وجود دارند دارای محدودیت می‌باشد و باید اشاره کرد که چون خصوصیات آبخوان را این روش به صورت یکنواخت در نظر می‌گیرد پس نتایج دقیقی را ارائه نمی‌دهد.

$$R = \sqrt{\frac{Qt}{n\pi H}} \qquad (۳)$$

که در آن R شعاع دایره (متر)، Q نرخ پمپاژ چاه (متر مکعب بر روز)، تخلخل آبخوان (درصد)، H طول اسکرین چاه (متر)، t زمان گذر تا چاه پمپاژ (روز) معادل با مدت زمانی که طول می‌کشد که یک آلاینده قبل از رسیدن به چاه مستهلک شود. با بررسی دقیق‌تر این رابطه و همچنین با توجه به رابطه دارسی و سرعت واقعی حرکت آب در خاک مشخص خواهد شد که هر چه تخلخل خاک بیشتر شود سرعت حرکت مواد آلاینده در خاک بیشتر شده و در نتیجه مواد با سرعت بیشتری به سطح آب زیرزمینی رسیده و نیاز به حریم کیفی بزرگتری می‌گردد. همچنین از طرفی هر چه دبی پمپاژ و زمان گذر بیشتر گردد مدت زمان بیشتری در نظر گرفته شده و در نتیجه شعاع حریم کیفی بیشتری باید در نظر گرفته شود.

- روش تحلیلی[۸]

این روش با توجه به خصوصیات آبخوان حریم کیفی چاه‌های شرب را محاسبه می‌کند که با توجه به اینکه از خصوصیات آبخوان در این روش بهره برده می‌شود در نتیجه نتایج واقعی‌تری را نسبت به روش شعاع ثابت ارائه می‌کند. این روش عموماً حریم کیفی بزرگتری را در نظر گرفته که این حریم کیفی بزرگتر موجب ایجاد محدودیت بیشتر در منطقه و به تبع آن تملک زمینهای بیشتر در اطراف چاه شده که در نهایت منجر به صرف هزینه‌های بیشتر خواهد شد. همچنین این مدل‌ها برای درک سیستم‌های شبکه آب زیرزمینی و انتقال آلودگی بسیار مفید می‌باشند. در این روش خصوصیات آبخوان از قبیل هدایت هیدرولیکی، تراز آب زیرزمینی، عمق چاه، ضخامت آبخوان، زمان، تعداد خطوط هم‌پتانسیل و سایر خصوصیات ذاتی آبخوان به مدل وارد شده و با استفاده از رابطه دارسی حریم کیفی تعیین می‌شود.

۲-۵ مدل DRASTIC

مدل DRASTC که توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا توسعه یافته است (Aller et al., 2003). در این مدل پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان بر اساس هفت پارامتر عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط اشباع آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، محیط غیراشباع آبخوان (I) و هدایت‌هیدرولیکی آبخوان (C) تعیین می‌گردد. در روش DRASTC برای هر یک از مشخصه‌های مؤثر بر آسیب‌پذیری آبخوان، عدد شاخصی بین ۱ تا ۱۰ برای هر مشخصه در نظر گرفته شده است. عدد ۱۰ معرف بیشترین آسیب‌پذیری و عدد ۱ نمایانگر کمترین آسیب‌پذیری آبخوان است. پس از تعیین عدد شاخص مربوط به هر نقطه، نقشه آسیب‌پذیری آبخوان

در ارتباط با مشخصه مورد نظر در محیط GIS تهیه می‌گردد. سپس شاخص‌های تعیین شده برای هر یک از هفت مشخصه مدل دراستیک در ضرائب وزنی مربوطه ضرب شده و اعداد به دست آمده با هم جمع می‌شوند تا شاخص آسیب‌پذیری کل در هر نقطه محاسبه گردد. با توجه به ضرایب ارائه شده در جدول زیر شاخص آسیب‌پذیری کل در روش DRASTC به روش زیر بدست می‌آید:

(۴)

$$\text{شاخص آسیب‌پذیری دراستیک} = (5\times D)+(4\times R)+(3\times A)+(2\times S)+T+(5\times I)+(3\times C)$$

در رابطه (۴) و همچنین با مراجعه به جدول ۱ نسبت به اهمیت هر مشخصه در میزان آسیب‌پذیری آبخوان، ضریب وزنی برابر ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود. ضریب وزنی ۵ مربوط به مهم‌ترین مشخصه‌ها و ضریب ۱ مربوط به کم اهمیت‌ترین آن‌ها می‌باشد.

هر کدام از پارامترهای رابطه ۴ به شرح زیر می‌باشند:

عمق آب‌زیرزمینی (D): عمق آب زیرزمینی تعیین کننده فاصله‌ای است که مواد آلاینده بایستی طی کند تا به سطح ایستابی آبخوان برسند. معمولاً ظرفیت میرایی با افزایش این فاصله افزایش می‌یابد، چرا که هر چقدر عمق آب زیرزمینی بیشتر باشد، زمان گذر و امکان پالایش آلوده‌کننده افزایش می‌یابد. با استفاده از آمار و اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای موجود در دشت، نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی تهیه شد.

تغذیه خالص (R): مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ کرده و به سطح ایستابی می‌رسد. این آب ضمن عبور از ناحیه غیراشباع خاک، مواد آلاینده موجود در سطح زمین (و یا لایه‌های کم‌عمق خاک) را در راستای قائم به حرکت درآورده و در نتیجه امکان رسیدن این مواد به محیط آبخوان را فراهم می‌کند. معمولا هر چقدر تغذیه بیشتر باشد، پتانسیل آلودگی آب نیز بیشتر است؛ چرا که در این حالت فرآیند انتقال مواد آلاینده از سطح به عمق ساده‌تر صورت می‌پذیرد. برای تهیه نقشه تغذیه خالص دشت، ابتدا تغذیه خالص‌های مربوط به ارتفاعات، بارندگی، رواناب و پساب که در رابطه با بیلان به دست آمد، با هم جمع شد. سپس با توجه به نقشه هدایت هیدرولیکی دشت و مقدار نفوذپذیری آن، میزان تغذیه خالص تقسیم‌بندی شد. نقشه تغذیه خالص به صورت رستری و اندازه سلول ۱۰۰ متری تهیه شد و با توجه به رتبه‌ای که در محاسبه شاخص آسیب‌پذیری برای این پارامتر در نظر گرفته شد (جدول DRASTIC)، نقشه رتبه‌بندی تغذیه بدست آمد.

محیط آبخوان (A): بیان کننده خصوصیت مواد میرایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان و میزان پویایی و تحرک آلودگی در میان اجزاء آبخوان است. که این اطلاعات از نقشه زمین‌شناسی و اطلاعات مربوط به لوگ گمانه‌های اکتشافی منطقه بدست می‌آید. برای این لایه از لوگ‌های حفاری چاه‌های اکتشافی به صورت نقطه‌ای برای تهیه نقشه خاک، منطقه غیراشباع و اشباع استفاده شده است. بنابراین با استفاده از لوگ‌های حفاری موجود در محدوده مطالعاتی و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک، نوع و جنس آبخوان مشخص شد.

محیط خاک (S): بدین صورت است که هرچه نفوذپذیری خاک کمتر باشد انتقال آلودگی به محیط آبخوان سخت‌تر بوده و هر چه نفوذپذیری یک خاک بیشتر باشد نفوذپذیری مواد آلاینده به داخل آبخوان ساده‌تر انجام خواهد گرفت. با استفاده از لوگ‌های‌حفاری نوع و جنس خاک تا عمق ۲ متری مشخص شد. برای تهیه نقشه محیط خاک از موقعیت چاه‌های حفاری، نوع و جنس خاک و ارزش مربوط به هر کدام با توجه به جدول ارزش‌دهی در محیط ArcMap استفاده شد. نقشه محیط خاک به صورت رستری و اندازه سلول ۱۰۰ متری تهیه شد و رتبه‌بندی گردید.

توپوگرافی (T): حرکت آلوده‌کننده و نگهداری آن را بر سطح زمین کنترل می‌کند و شیب‌های کم موجب می‌شوند حرکت آلوده‌کننده‌ها در سطح زمین کند شده و در نتیجه این مواد شانس بیشتری برای نفوذ در خاک دارند. بنابراین شیب کم پتانسیل بیشتری برای آلودگی آب زیرزمینی ایجاد خواهد کرد. برای تهیه نقشه شیب از نقشه رقومی توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ استفاده شد. سپس این نقشه به رستر تبدیل شد و به کمک آن مقدار شیب به صورت درصد برای هر سلول محاسبه شد. در انتها و بر اساس جدول DRASTIC این مقادیر نیز رتبه‌بندی گردید.

اثر محدوده غیر اشباع (I): نفوذپذیری بالا منجر به حرکت آزاد آلاینده‌ها می‌شود و این باعث آسیب‌پذیر شدن منطقه و افزایش آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود. در نتیجه این پارامتر به جنس لایه غیراشباع محدوده مورد نظر بستگی خواهد داشت. با استفاده از لوگ‌های حفاری چاه‌ها و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک نوع و جنس منطقه غیر اشباع مشخص شد. برای تهیه منطقه غیر اشباع از موقعیت چاه‌های حفاری، نوع و جنس منطقه غیر اشباع و ارزش مربوط به هر کدام از جدول رتبه‌دهی استفاده شد.

هدایت هیدرولیکی آبخوان (C): هرچه میزان هدایت هیدرولیکی آبخوان بیشتر باشد، مواد آلاینده ساده‌تر در محیط آبخوان منتشر

خواهند شد. به عبارت دیگر هرچه سرعت انتشار مواد آلاینده بیشتر باشد، پتانسیل حذف مواد آلاینده کمتر خواهد بود. با توجه به آنکه در محدوده مورد نظر از آزمایش پمپاژ استفاده نشده است بنابراین از مقادیر کالیبره شده در مدل GMS برای این لایه استفاده گردید. سپس در محیط ArcMap این مقادیر به صورت رستری و اندازه سلول ۱۰۰ متری تهیه شد.

با بررسی مطالعات انجام شده برای تعیین حریم کیفی چاه‌های شرب مشخص گردید در مناطقی که نقشه آسیب‌پذیری (DRASTC) محدوده مـــورد نظر تهیه گردیده نتایج دقیق‌تر و قابل استنادتری بـرای تعیین حـریم کیفی چاه‌های آب شرب وجـــود خواهد داشت (Abedi Kouoai et al., 2017).

۳- اجرای مدل و تحلیل نتایج

۳-۱- ساخت مدل مفهومی آبخوان و نتایج کالیبراسیون MODFLOW

هدف از تهیه مدل مفهومی ساده کردن شرایط واقعی منطقه مورد مطالعه و سازماندهی داده‌های صحرایی است؛ به گونه‌ای که با استفاده از آن، سیستم مورد نظر راحت‌تر مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. مدل مفهومی در این مطالعه از هفت لایه اطلاعاتی (کاوریج) تشکیل شد که کاوریج‌های مربوط به این مدل عبارتند از: مرز آبخوان، چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های بهره‌برداری، تبخیر، تغذیه از آبخوان، هدایت هیدرولیکی، رودخانه و مقدار آبدهی ویژه می‌باشند. شبکه سلولی به کار رفته سلول‌هایی با اندازه‌های مساوی (۱۵۰۰*۱۵۰۰) و دارای ۱۵ سطر و ۱۵ ستون و یک لایه و کلا ۲۲۵ سلول دارد که از این تعداد ۱۱۸ عدد فعال هستند و باقی آنها سلول‌های غیرفعال در مدل‌سازی (خارج از محدوده مدل‌سازی) هستند. فرضیات در نظر گرفته شده در ساخت مدل عبارتند از: آبخوان محدوده مطالعاتی بصورت تک لایه و به عنوان آبخوان آزاد در نظر گرفته شده و مدل‌سازی ناحیه غیر اشباع انجام نشده است. مرزهای مدل که از طریق نقشه هم تراز چاه‌های مشاهده‌ای بدست آمد، شامل چهار جبهه ورودی و خروجی بوده که مناطق شمال شرقی و شمال غربی آبخوان به عنوان مرزهای ورودی و قسمت‌های جنوب و جنوب غربی آبخوان به عنوان مرزهای خروجی این محدوده در نظر گرفته شدند. در این مدل ضرائب هدایت هیدرولیکی و تغذیه آبخوان و نیز مقدار آبدهی ویژه به عنوان پارامترهای مدل در نظر گرفته شد مقدار اولیه هدایت هیدرولیکی از آنجایی که در محل مورد نظر آزمایش پمپاژ صورت نگرفته است به طور تقریبی برابر ۲۰ متر بر روز در نظر گرفته شد. همچنین مقادیر اولیه تغذیه آبخوان مذکور برای منطقه کشاورزی برابر با ۰/۷۰۰۰ و برای منطقه شهری برابر با ۰/۴۰۰ در نظر گرفته شد که این مقادیر به ترتیب ۱۶ و ۱۱ درصد از کل تغذیه آبخوان می‌باشند. در نهایت مقدار آبدهی ویژه آبخوان همانطور که در گزارش بیلان دشت مربوطه آورده شده است برابر با ۰/۹۵ در نظر گرفته شد که در کالیبراسیون این مقادیر به روش PEST (روش خودکار) کالیبره گردید.

در حالت ماندگار پارامتر مربوط به ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان به گونه ای کالیبره شد که این مقدار از ۵ تا ۶۰ متر بر روز متغیر بوده و نیز اطلاعات مربوط به خطای مدل از قبیل معیار جذر میانگین مربعات خطا و سایر شاخصهای آماری کالیبراسیون مدل (جدول ۲) ارائه شده است. همچنین در حالت غیرماندگار نیز مقادیر تغذیه و ضریب آبدهی ویژه کالیبره شد که مقادیر واسنجی شده این پارامترها نیز به ترتیب برای تغذیه آبخوان از ۰/۰۰۰۴ تا ۰/۰۰۲ متغیر بوده و برای ضریب آبدهی ویژه این مقدار عددی از ۰/۳ الی ۰/۸۵ بدست آمد که نقشه‌های پهنه‌بندی آن در شکل ۴ آورده شده است. همچنین مطابق با حالت ماندگار مقادیر معیار جذر میانگین مربعات خطا و سایر شاخصهای آماری کالیبراسیون مدل (جدول ۳) آورده شده است.

Table 1- Weight of different parameters in the DRASTIC model

جدول ۱- علائم اختصاری و ضرایب وزنی مربوط به مشخصه‌های مختلف در مدل DRASTIC

Parameter	Abbreviation signs	Weight factor in the Drastic model
Depth to water	D	5
Recharge	R	4
Aquifer media	A	3
Soil media	S	2
Topography	T	1
Impact of the vadose Zone media	I	5
Hydraulic Conductivity of aquifer	C	3

مدل در حالت ماندگار با استفاده از اطلاعات سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ و در حالت ناماندگار با استفاده از اطلاعات سه سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ الی ۹۲-۱۳۹۱ ساخته و کالیبره شد. معیار جذر میانگین مربعات خطا برای حالت ماندگار ۱/۴۹ متر و برای حالت ناماندگار برابر با ۲/۳ متر شد که نشانگر دقت قابل قبول در شبیه‌سازی وضعیت آبخوان برای دو حالت ماندگار و غیرماندگار است. همچنین واسنجی مدل ذکر شده در حالت پایدار برای سال آبی ۱۳۹۰ صورت گرفت که میانگین مجذور مربعات خطا برابر با ۱/۵۶ و در حالت ناپایدار از سال آبی ۱۳۹۱ برای واسنجی استفاده گردید. در این حالت نیز میانگین مجذور مربعات خطا برابر با ۲/۵۲ بدست آمد. برای مدل مذکور نتایج تغییرات هد تراز آب زیرزمینی در مدل ماندگار نیز مطابق با شکل ۳ آورده شده است.

۳-۲- نتایج حریم کیفی

مطابق شکل ۴ و با بررسی دقیق‌تر توسط جدول ۴ مشاهده شد که چاه‌های شرب در محدوده کاربری‌های کشاورزی، مراتع ضعیف و مراتع متوسط حفر گردیده که از این تعداد چاه‌ها ۴۰ درصد در منطقه کشاورزی، ۳۳ درصد در محدوده مراتع ضعیف و نزدیک به ۲۷ درصد چاه‌ها در مراتع متوسط قرار دارند. در جدول ۵ مساحت کاربری‌های مختلف در محدوده حریم کیفی ۱۰ ساله چاه‌های آب شرب ارائه شده است. با استفاده از این جدول می‌توان اولویت حفاظت کیفی در هر یک از کاربری‌ها را با توجه به وسعت آنها در محدوده حریم کیفی مشخص نمود.

Table 2- Statistical summary of modeling results in steady state

جدول ۲- خلاصه آماری نتایج مدل‌سازی در حالت ماندگار

parameter	Value
RMSE	1.50
R	0.996

Table 3- Statistical summary of modeling results in unsteady state

جدول ۳- خلاصه آماری نتایج مدل سازی در حالت غیرماندگار

parameter	Value
RMSE	2.32
R	0.88

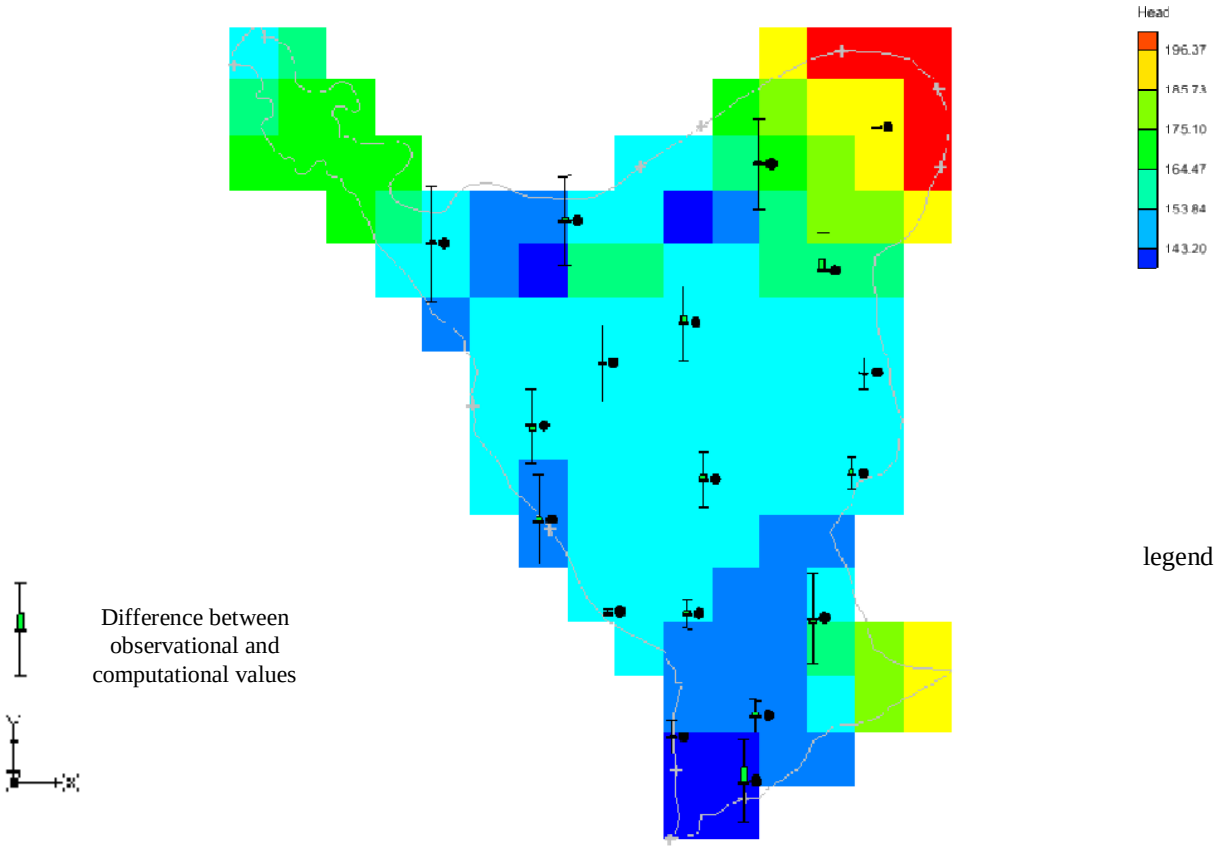

Fig. 3- Results of calibrated model in the study area in steady state (Variation of groundwater head and error in observation wells)

شکل ۳- نتایج مدل کالیبره شده در محدوده مطالعاتی در حالت ماندگار (تغییرات تراز آب زیرزمینی و میزان خطا در چاه‌های مشاهداتی)

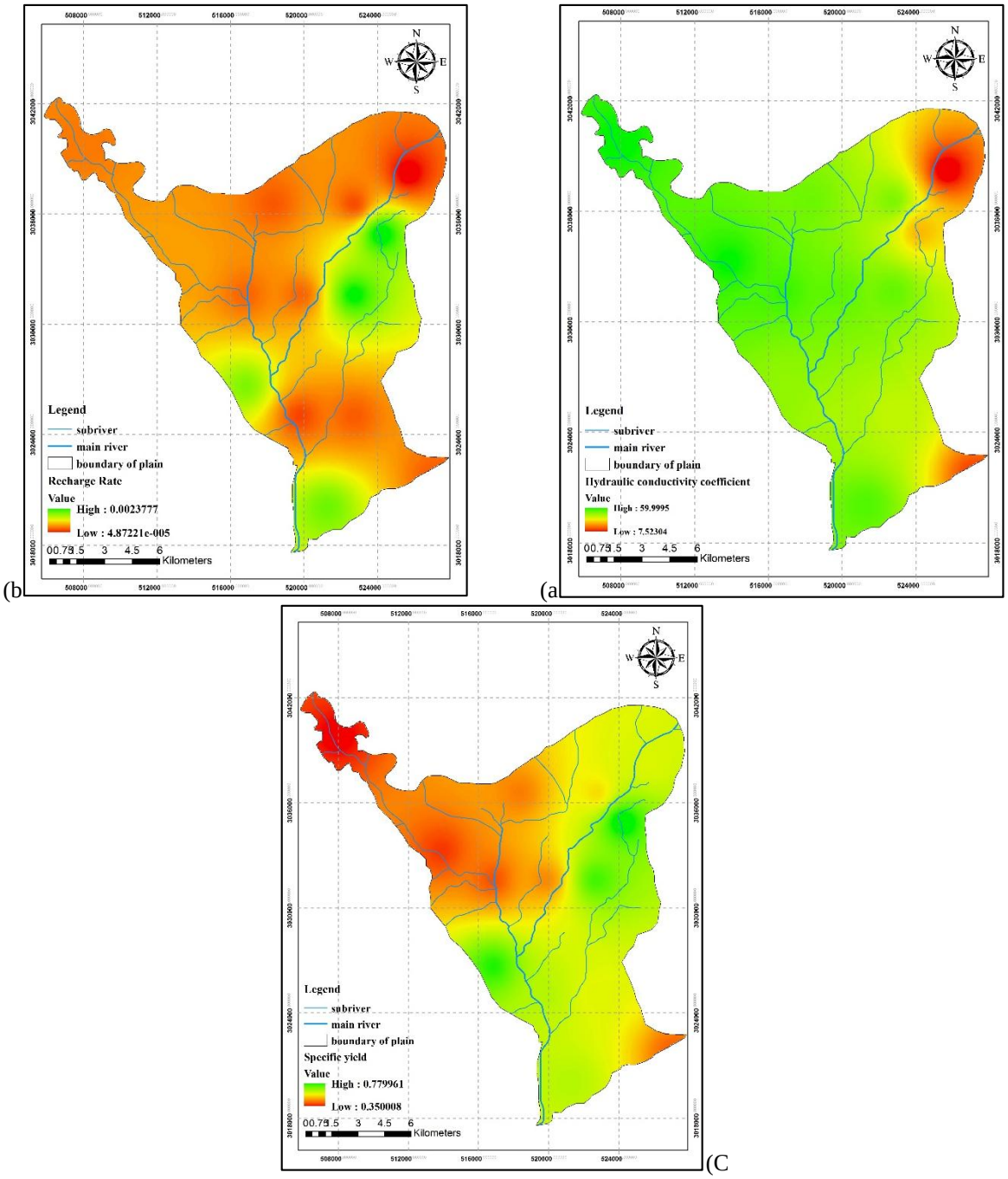

Fig. 4- Scaling of the calibrated aquifer parameters a) Hydraulic conductivity (m/d) b) Aquifer recharge (m/d) c) Special discharge coefficient

شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی پارامترهای کالیبره شده آبخوان a) هدایت هیدرولیکی (m/d)، b) نرخ تغذیه آبخوان (m/d)، c) ضریب آبدهی ویژه

همانطور که پیشتر اشاره شد اکثر چاه‌های شرب دشت رودان در مناطق با کاربری مرتع متوسط، کشاورزی و مرتع ضعیف هستند، از این‌رو مدیریت مصرف کود و سموم و همچنین چرای دام ضروری است. چاه‌های شرب شماره ۳ و ۴ دارای دبی مساوی بوده ولیکن چاه شماره ۴، ۳۰ درصد عمق بیشتری نسبت به چاه شماره ۳ دارد، از این‌رو شعاع حریم کیفی این چاه حدود ۱۰ درصد از شعاع چاه شماره ۳ کمتر است؛ زیرا عمق این چاه بیشتر بوده بنابراین دیرتر در معرض آلودگی قرار می‌گیرد و نهایتاً شعاع کمتری مورد نیاز است. در حالت کلی می‌توان

گفت که حریم کیفی چاه‌های آب شرب بسته به تخلخل خاک و زمان گذر و دبی پمپاژ از چاه‌ها متغیر است.

۳-۳- نتایج مدل DRASTIC

نتایج مدل DRASTC در شکل ۶ ارائه شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌گردد که منطقه موردنظر در ناحیه‌ای با آسیب‌پذیری بالا بوده و این دلیل باعث اهمیت پیدا کردن تعیین حریم کیفی چاه‌های شرب آبخوان می‌گردد. نواحی شمالی و شمال غربی محدوده دشت از آسیب‌پذیری بالایی برخوردار بوده و همچنین ناحیه مرکزی دشت از آسیب‌پذیری کمتری برخوردار می‌باشند. تأثیر پارامترهای مختلف بر روی هم و همچنین وزن‌دهی لایه‌ها منجر به این نتیجه گشته که ناحیه‌ای با شیب کم که دارای آسیب‌پذیری بالایی برای نفوذ آلاینده‌ها

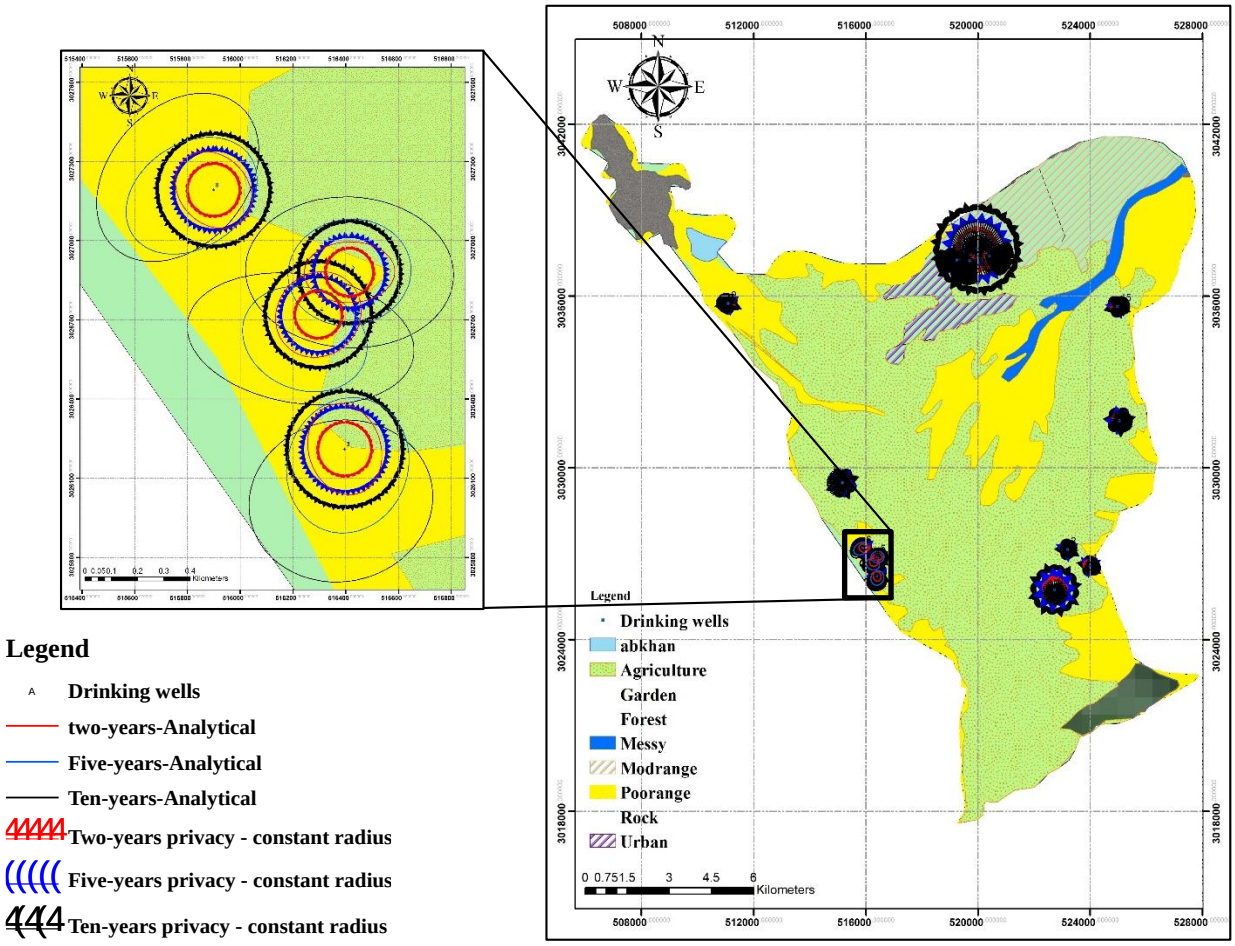

Fig. 5- Land use of water quality protection zone for domestic water wells of Rudan plain (Accurate Radius Method and Analytical Method for Two, Five and Ten Years)

شکل ۵- کاربری اراضی در محدوده حریم کیفی چاه‌های آب شرب دشت رودان (روش شعاع ثابت و روش تحلیلی برای گذر زمانهای دو، پنج و ده ساله)

Table 4- Percentage of different land use in the area and allocation of wells to them

جدول ۴- درصد کاربری اراضی مختلف در محدوده مورد نظر و تخصیص چاه‌ها به آن‌ها

Land Use	Area(m^2)	Area(%)	Number of wells	Percentage of wells
Poor range	53760536.72	23.29	5	33
Mod range	22224046.49	9.63	4	27
Agriculture	129379049	56.07	6	40

Table 5- Specifications for drinking wells per well
جدول ۵- درصد قرارگیری حریم چاه‌های مختلف در هر کاربری اراضی

method	Area of Fix radius method in each land use				Area of Fix Analytical method in each land use			
land use	Poor range	mod range	Agriculture	urban	Poor range	mod range	Agriculture	urban
W(0)	0	0	100	0	0	0	100	0
W(1)	12.8	0	87.2	0	22.12	0	77.88	0
W(2)	0	0	100	0	0	0	100	0
W(3)	66	0	34	0	89.89	0	10.11	0
W(4)	79	0	21	0	70.03	0	29.97	0
W(5)	49	0	51	0	18.21	0	81.79	0
W(6)	84	0	16	0	92.12	0	7.88	0
W(7)	0	0	100	0	0	0	100	0
W(8)	0	0	100	0	0	0	100	0
W(9)	100	0	0	0	100	0	0	0
W(10)	0	100	0	0	0	85.68	14.32	0
W(11)	0	78	18.5	3.5	0	96.1	3.9	0
W(12)	0	100	0	0	0	57.65	32.07	10.28
W(13)	0	100	0	0	0	57.67	0	42.33
W(14)	0	0	100	0	0	0	100	0
W(15)	0	0	100	0	0	0	100	0

به داخل آبخوان می‌باشد به دلایل افزایش عمق آبخوان و سایر دلایل دیگر به محیطی با آسیب‌پذیری متوسط و کمتر تبدیل گردد.

مطابق جدول ۶ مشاهده شد که ۷۰ درصد چاه‌های آب شرب دشت رودان در محدوده با آسیب‌پذیری بالا قرار دارند. این موضوع ضرورت حفاظت کیفی از چاهها را در این محدوده‌ها نشان می‌دهد. در مقایسه بین چاه با ویژگی‌های یکسان و تفاوت در یک پارامتر این بار دو چاه با دبی‌های متفاوت در نظر گرفته شدند. چاه‌های شماره ۱۲ و ۱۳ به گونه‌ای انتخاب شدند که در میزان عمق چاه و زمان گذر دارای مقادیر یکسانی بوده و تنها تفاوت آن‌ها در میزان دبی برداشت شده می‌باشد به صورتی که چاه شماره ۱۲ چون دارای میزان دبی برداشت شده بیشتری به میزان تقریبی ۳۷ درصد بیشتر از چاه شماره ۱۳ می‌باشد میزان شعاع حریم کیفی این چاه حدود ۱۹/۰۷ درصد از شعاع چاه شماره ۱۳ بیشتر است و دلیل منطقی آن است که چون میزان دبی برداشت شده چاه شماره ۱۲ بیشتر می‌باشد پس سریع‌تر در معرض آلودگی قرار می‌گیرد و نهایتاً شعاع بیشتری مورد نیاز می‌باشد. در حالت کلی می‌توان گفت که شعاع حریم کیفی برای یک عمق ثابت و زمان گذر مشابه با میزان دبی برداشت شده متفاوت (بیشتر و یا کمتر) به ترتیب شعاع حریم بیشتر و کمتری را دارا خواهد بود. همچنین جدول شماره ۷ به بررسی شعاع حریم کیفی قرار گرفته در محدوده‌های با آسیب‌پذیری مختلف می‌پردازد. مطابق با این بررسی مشخص شد که در روش شعاع ثابت نسبت به روش تحلیلی شعاع کوچکتری در نظر گرفته شده و همچنین روش تحلیلی محدوده محافظه کارانه‌تری را در نظر می‌گیرد که این موجب می‌گردد در روش تحلیلی حریم کیفی چاه در محدوده وسیع‌تری قرار گیرد و شاخص آسیب‌پذیری در این روش نسبت به شعاع ثابت محاسبه شده بیشتر است.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه به منظور ترسیم حریم کیفی چاه‌های شرب از خروجی‌های مدل GMS v 7.1 و سپس استفاده از نرم‌افزار WhAEM2000 برای تعیین حریم کیفی چاه‌های دشت رودان در استان هرمزگان استفاده شد. برای این منظور، پس از کالیبراسیون مدل در حالت ماندگار و غیر ماندگار و همچنین اعتبارسنجی مدل برای هر دو حالت، مقادیر ضرایب هدایت هیدرولیکی، ضخامت آبخوان و غیره از نرم‌افزار MODFLOW تعیین شد. سپس از این مقادیر برای تعیین حریم کیفی چاه‌های شرب در نرم‌افزار WhAEM2000 استفاده شد. در گام بعدی شعاع حریم کیفی چاه‌های آب شرب بر اساس میزان آسیب‌پذیری آبخوان تعیین گردید. از این‌رو آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از مدل DRASTIC در سه سطح آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد تعیین شد. در ادامه با مشاهده نقشه کاربری اراضی و همچنین نقشه خطرپذیری آبخوان مشخص شد که اکثر چاه‌های شرب در

محدوده با آسیب‌پذیری بالا و با کاربری اراضی کشاورزی قرار دارند. بنابراین در این مناطق زمان ۱۰ سال مبنای تعیین حریم کیفی قرار گرفت. برای مناطق با آسیب‌پذیری متوسط اعمال حریم ۵ ساله مناسب بوده و مناطق با آسیب‌پذیری کمتر برای جلوگیری از اتلاف هزینه، حریم کیفی ۲ ساله مدنظر قرار گرفت. همچنین از آنجایی که روش تحلیلی حریم کیفی بزرگتر و محافظه کارانه‌تری را نسبت به روش شعاع ثابت در نظر می‌گیرد و همچنین با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه در شرایط با آسیب‌پذیری بالا قرار دارد، استفاده از این روش پیشنهاد شد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، استفاده از ترکیب سه مدل WhAEM2000، MODFLOW و DRASTIC در تعیین دقیق حریم کیفی چاه‌های آب شرب بسیار مؤثر است.

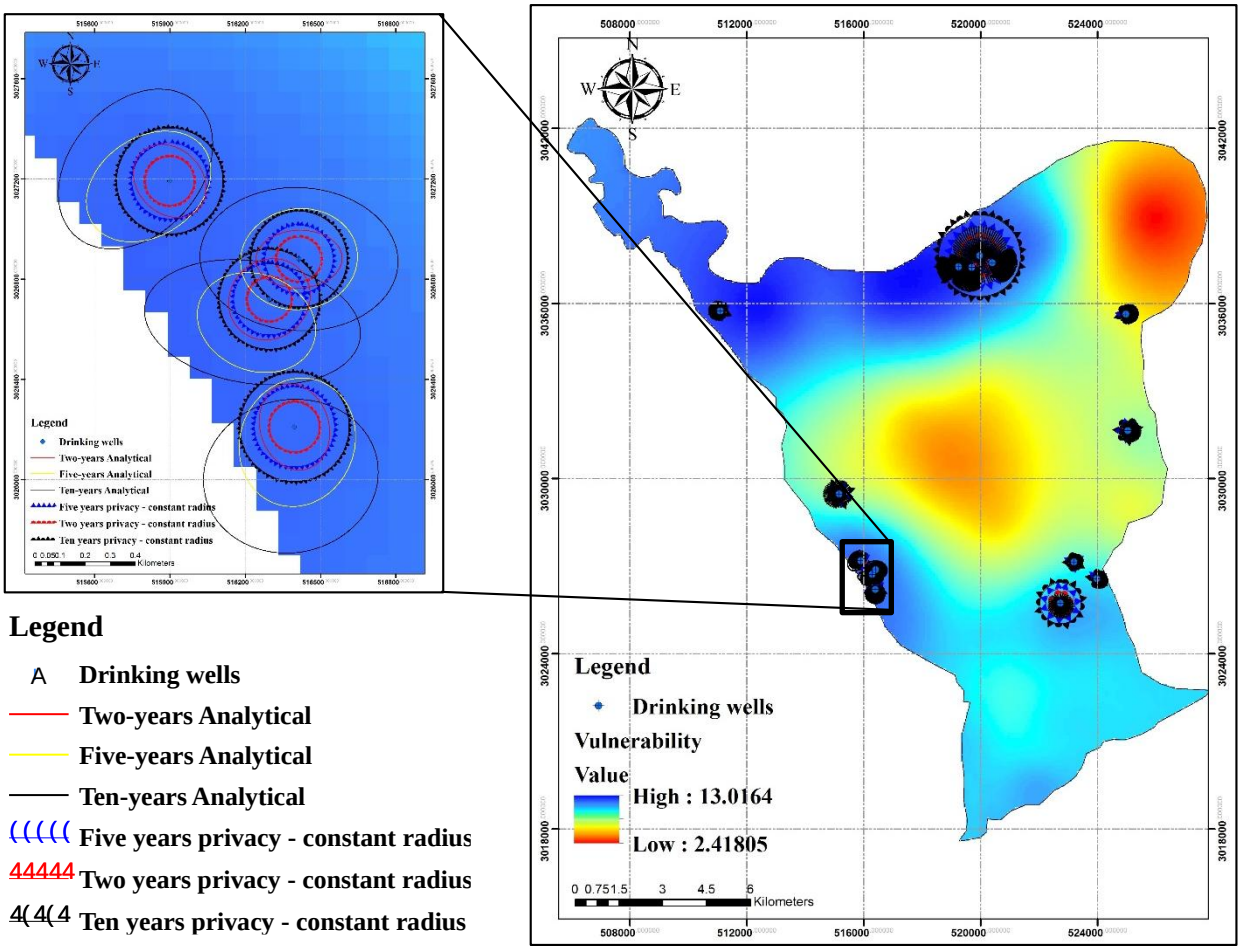

Fig. 6- Vulnerability of groundwater quality in protection zone of domestic water wells at Rudan plain (Accurate Radius Method and Analytical Method for Two, Five and Ten Years)

شکل ۶- میزان آسیب‌پذیری کیفیت آب زیرزمینی در محدوده حریم کیفی چاههای آب شرب دشت رودان (روش شعاع ثابت و روش تحلیلی برای گذر زمانهای دو، پنج و ده ساله)

Table 6- Percentage of drinking water wells in different vulnerability zones

جدول ۶- درصد قرارگیری چاه‌های شرب در محدوده‌های با آسیب‌پذیری متفاوت

Vulnerability	Range	Area(m^2)	Area(m^2)	Number of wells	Percentage of wells
High	2-5.5	72745693.51	31.5	11	73
Medium	5.5-9.5	75924606.84	32.9	3	20
Low	9.5-13	82070520.9	35.5	1	7

Table 7- Percentage of Drinking Wells in Different Vulnerabilities

جدول ۷- درصد قرارگیری چاه‌های شرب در محدوده‌های با آسیب‌پذیری متفاوت

method	Area of protection zone (Constant radius method) in different vulnerability state			Area of protection zone (Analytical method) in different vulnerability state		
range	high (2-5.5)	Medium(5.5-9.5)	Low(9.5-13)	high(2-5.5)	Medium(5.5-9.5)	Low(9.5-13)
W(0)	100	0	0	100	0	0
W(1)	100	0	0	82	18	0
W(2)	0	70	30	0	76	24
W(3)	100	0	0	100	0	0
W(4)	100	0	0	100	0	0
W(5)	100	0	0	100	0	0
W(6)	100	0	0	100	0	0
W(7)	0	42	58	0	46.5	53.5
W(8)	0	52.14	47.86	0	58.58	41.42
W(9)	100	0	0	100	0	0
W(10)	100	0	0	100	0	0
W(11)	100	0	0	100	0	0
W(12)	100	0	0	100	0	0
W(13)	100	0	0	100	0	0
W(14)	0	100	0	0	46.5	53.5
W(15)	100	0	0	100	0	0

پی‌نوشت‌ها

1- Strongly Implicit Procedure
2- Successive Over Relaxation
3- Slice Successive Over Relaxation
4- Preconditioned Conjugate Gradients
5- Wellhead Protection Programs
6- Source Water Assessment Planning
7- Calculated Fix Radial Method
8- Analytical Method

۵- مراجع

Abarashi F, Haghi M, Meftah M, Rahimian M (2014) Determination of effective factors on drinking wellhead protection area by using simulation groundwater model (Case study: Zarringol Plain). Iranian Journal of Irrigation and Drainage 8(3) (In Persian)

Abedi Kouoai j, Zamani N, Goodarzi M, Akhavan S (2017) Studying different methods for wellhead protection area delineation using WhAEM2000 analytic model in drinking wells of Damaneh-Daran. Iran-Water Resources Research 13(4):39-50

Abrishmchi A (2012) Wellheaad protection guide for packaging drnking wells. Department of Water and Wastewater, Ministry of Energy, Code-404-a (In Persian)

Akbarpur A, Etebari B, Borzuni S (2011) Groundwater modeling in order to determine wellhead protection area of drinking wells (case study: Birjand). In proc. Of 4th Iran Water Resource Management Conference, 3- May, Tehran (In Persian)

Alizadeh A, Afshin S, Danesh S (2009) Determination and mapping of wellhead protection of Mashhad protection defining strategy and setting priorties. The World Bank Global Partnership Associate Program, Note 8, Pp 4

Aller L, Lehr J H, Petty R, and Bennett T (1987) DRASTIC: A standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America

Badv K (2005) Fundamentals of capture zone calculation for qualititative protection of urban drinking waterwells. Esteghlal 23(2):77-91 (In Persian)

Badv K, Mollaie M (2005) Standards and methods of wellhead protection delineation- Case study for number 33 drinking well of Urmia. First National Civil Engineering Conference, 3-4 May Tehran (In Persian)

Ehtiat M, Mousavi S J, Vaghefi S A, and Ghaheri A (2016) Analysis of recharge conceptualization in inverse groundwater modelling. Hydrological Sciences Journal 61(15):2789-2801

Javadi S, Kavehkar N, Mousavizadeh M H, Mohammadi K (2011) Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate

Rezaei F, Safavi H R, and Ahmadi A (2013) Groundwater vulnerability assessment using fuzzy logic: A case study in the Zayandehrood aquifers, Iran. Environmental Management 51(1):267-277

Sabet Raftar A (2013) Groundwater protection area instruction. Ministry of energy. Management and Planning Organization, Department of Engineering and Technical standards of Water and Wastewater, Code-621 (in Persian)

Safavi H R, Rastghalam M (2017) Solution to the water crisis in the Zayandehrud River basin; joint supply and demand management. Journal of Iran-Water Resources Research 12(4):12-22 (In Persian)

Siarkos I and Latinopoulos P (2012) Delineation of wellhead protection zones for the control of point pollution sources in the aquifer of N. Moudania, Greece. European Water 40:3-17

Soltani S, Asghari Moghadam A, Barzegar R, and Kazemian N (2018) Ulnerability assessment of Kordkandi-Duzduzan Plain groundwater using calibrated DRASTIC model. Journal of Iran-Water Resources Research 13(4):89-99 (In Persian)

Todd W R, Kenneth R B, and Maureen A M (2001) Report delineation of capture zone for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay Wisconsin. USA., Journal of Hydrology 9:432- 450

Zamani N (2016) Groundwater protection using vulnerability map with fuzzy clustering method and determining wellhead protection area of Damaneh Daran aquifer's drinking wells. Water Recourses Engineering, M.Sc. Thesis, Isfahan University of Technology, Geographical Research 92(1):109-127 (In Persian)

measurements in agricultural areas. Journal of Agricultural Science and Technology 13(2):239-249

Karimi L, Javid A, Babaei Y (1389) Determination of the point of the groundwater resources using the guidelines on how to issue a permit for water packaging for drinking purposes (Proposed by the Ministry of Energy) and WhAEM2000 (Proposed by EPA) (Case study: Bojnourd Park Drinking Well). National Clean Water Conference (In Persian)

Khodabakhshi N, Asadollahfardi G, and Heidarzadeh N (2015) Application of a GIS-based DRASTIC model and groundwater quality index method for evaluation of groundwater vulnerability: A case study, Sefid-Dasht. Water Science and Technology: Water Supply 15(4):784-792

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 Managment of Water Resources, Pp 21-34

Niknam R, Mohammadi K, and Majd V J (2007) Groundwater vulnerability evaluation of Tehran-Karaj Aquifer using DRASTIC method and fuzzy logic. Journal of Iran-Water Resources Research 3(2):39-47 (In Persian)

Rahman M and Shahid S H (2008) Modeling groundwater flow for the delineation of wellhead protection areas around a water-well at Nachole of Bangladesh. Journal of Spatial Hydrology 4(1):13-22

Rezaei F, Ahmadzadeh M R, and Safavi H R (2017) SOM-DRASTIC: Using self-organizing map for evaluating groundwater potential to pollution. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 31:1941-1956, doi: 10.1007/s00477-016-1334-3