اثر پارامترهای چاه و آبخوان بر حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان‌های آزاد آبرفتی

امین احمدی*[۱]، منوچهر چیت‌سازان[۲]، سید یحیی میرزایی[۳]، آرش ندری[۴]

۱. دانشجو دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۴. دکتری، گروه منابع آب آریزونا، فونیکس، آمریکا

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵**

چکیده

تحلیل حریم‌های تأثیر، آبگیر، تخلیه و تغذیه به منظور حفاظت از چاه‌های آب امری ضروری است. این موضوع علی‌رغم پژوهش‌های متعدد هنوز جای بحث و بررسی بیشتر دارد. هدف از این پژوهش تحلیل حریم‌های آبگیر و تخلیه در چاه‌های آب در آبخوان‌های آزاد آبرفتی است. در این راستا یک آبخوان فرضی با استفاده از مدل‌های مادفلو و مادپس شبیه‌سازی شد. صحت خروجی‌های مدل عددی در مقایسه با محاسبات تحلیلی تائید و سپس اثر پارامترهای مستقل چاه و آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق نشان داد که برخلاف تصور رایج، تغییر در هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، شیب سنگ بستر، ضخامت اولیه، تخلخل و ناهمگنی هیچ‌گونه تغییری در گسترشِ سطحیِ حریم آبگیر چاه در آبخوان آزاد ایجاد نمی‌کند. این پژوهش نشان داد که تغییر در تغذیه‌ی سطحی، دبی چاه و موقعیت چاه باعث ایجاد تغییرات زیاد در گسترشِ سطحیِ حریم آبگیر چاه در آبخوان‌های آزاد آبرفتی می‌شود. بررسی اثر زمان پمپاژ نشان داد که در یک سیستم تک‌چاهی ابتدا وسعت حریم آبگیر افزایش می‌یابد اما پس از مدت کوتاهی و علی‌رغم تداوم گسترش مخروط افت، موقعیت آن ثابت می‌ماند. مشخص شد که تغییر همه‌ی پارامترهای مذکور باعث تغییر در وسعت حریم تخلیه‌ی چاه می‌گردد. از آنجایی که پایداری وسعت مناطق مذکور در تعیین حریم‌های حفاظت از کمیت و کیفیت چاه‌های آب اهمیت زیادی دارد! مشخص شد که پایداری نسبی سطح آب در آبخوان در یک تراز مناسب لازم و ضروری است و این امر نیازمند مدیریت آبخوان و اختصاص درصد محدودی از تغذیه‌ی آبخوان به تخلیه از طریق چاه‌ها است.

کلمات کلیدی: حریم آبگیر، حریم تأثیر، حریم تخلیه، حریم تغذیه، حریم حفاظت، مادفلو، مادپس.

مقدمه

در آب‌های زیرزمینی و در چاه‌های آب، حریم آبگیر (Capture Zone) برای منطقه‌ای در اطراف چاه به کار رفته است که در تأمین آب چاه مشارکت دارد. واژه‌ی حریم آبگیر همراه با واژه‌های دیگری به کار می‌رود که همه‌ی این مناطق به نوعی در تأمین آب چاه مشارکت دارند. به منظور توصیف تفاوت آن‌ها در آبخوان‌های آزاد آبرفتی، هرکدام از آن‌ها را می‌توان به این صورت تعریف کرد: حریم آبگیر (CZ) منطقه‌ای سه بعدی و اشباع در آبخوان است که خطوط جریان موجود در آن به چاه ختم شده و مسیر حرکت آب به سمت چاه را مشخص می‌کند. حریم انتقال یا حریم تخلیه (Discharge Zone) بخشی از حریم آبگیر(CZ) در مجاورت چاه است که در مدت پمپاژ، آب آن تخلیه شده و با آب

* نویسنده مسئول: aminahmadi349@gmail.com
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.2.1019241

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

مناطق دورتر جایگزین می‌شود. حریم گیرش یا حریم تغذیه (Recharge Zone) منطقه‌ای سه بعدی و غیر اشباع در آبخوان است که تغذیه‌ی سطحی از طریق آن صورت می‌گیرد و در پلان منطبق بر حریم آبگیر (CZ) است. حریم مخروط افت یا حریم تأثیر (Influence Zone) منطقه‌ای سه بعدی و اشباع از آبخوان است که وجود چاه، باعث تغییر تراز و سرعت حرکت آب در آن می‌گردد.

برآورد حریم تأثیر چاه‌های آب از ابتدای پیدایش علم هیدرولیک چاه مورد توجه محققان بوده است. دوپویی (Dupuit, 1863) با فرض جزیره گرد و سپس تیم (Thiem, 1906) با فرض نامحدود بودن آبخوان روابط خود را برای برآورد مخروط افت در شرایط پایدار ارائه کردند. تایس (Theis, 1935)، نیومن ((Neuman, 1972, 1974 و مونچ (Moench, 1997) روابط خود را برای برآورد مخروط افت در شرایط ناپایدار ارائه دادند. با استفاده از روابط اخیر حریم تأثیر چاه برای هر زمان پس از شروع پمپاژ قابل دسترس است. روابط اخیر اگر برای یک آبخوان آزاد با سطح آب اولیه افقی و در یک سیستم تک‌چاهی به کار برده شوند عملاً حریم آبگیر (CZ) را هم مشخص خواهند کرد و در نهایت در شرایط پایدار کل آبخوان را در بر خواهند گرفت. اما به منظور تعیین دقیق‌تر حریم آبگیر (CZ) و سپس تعیین حریم تخلیه (DZ) به صورتی مستقل از حریم تأثیر (IZ)، تاکنون تحقیقات زیادی صورت گرفته است:

موسکات (Muskat, 1934) یکی از اولین پژوهشگرانی است که به طور مشخص در بحث حرکت رو به جلوی آب در چاه‌ها مطالعات مؤثری داشته است. او بدون اینکه از واژه‌ی حریم آبگیر (CZ) ذکری کرده باشد راه را برای مطالعات بعدی فراهم کرد. بیر و ژاکوب (Bear and Jacob 1965) روابطی را برای برآورد موقعیت جبهه‌ی پیشرونده در آبخوان محبوس با سطح آب شیب‌دار استخراج کردند. روابط آن‌ها یک سری روش حل تحلیلی غیر جبری برای یک چاه در یک آبخوان محبوس بود. این روابط برای یک چاه تخلیه یا تغذیه و در شرایط پایدار، موقعیت جبهه پیشرونده و موقعیت خط تقسیم پیرامون چاه را ارائه می‌داد. گرچه آن‌ها در این مقاله از عبارت حریم آبگیر(CZ) و حریم تخلیه (DZ) استفاده نکردند اما واژه‌ی خط تقسیم آب که آن‌ها به کار بردند در واقع همان موقعیت حریم آبگیر (CZ) را نشان می‌داد و عبارت خط جبهه پیشرونده معرف همان حریم تخلیه (DZ) بود. جواندل و تسانگ (Javandel and Tsang, 1986) رابطه‌ای جبری تحلیلی برای ترسیم حریم آبگیر در یک آبخوان محبوس همگن و ایزوتروپ ارائه کردند. این رابطه علاوه بر ترسیم حریم آبگیر در یک سیستم تک چاهی (Single Well System) امکان ترسیم حریم آبگیر (CZ) در سیستم‌های چند چاهی (Multi Well System) را برای شرایطی خاص فراهم می‌کرد. آن‌ها همچنین برای نسبت‌های مختلف دبی چاه به دبی جریان منطقه‌ای، خطوط حریم آبگیر را ترسیم کردند. شفر (Shafer, 1987) با استفاده از تئوری محاسبات معکوس یک روش حل عددی ارائه داد و با تهیه‌ی یک برنامه کامپیوتری امکان مسیریابی ذرات (Particle Tracking) رو به عقب (Backward) از چاه به سمت بالادست (Up Gradient) را فراهم کرد. نتیجه‌ی فعالیت او ترسیم خطوط مسیر (Path Lines) و نهایتاً حریم تخلیه (DZ) برای هر زمان گذر (Travel Time) در شرایط پایدار بود. البته در آن زمان استفاده از عبارت حریم تخلیه (DZ) مرسوم نبود و از آن به عنوان حریم آبگیر برای یک زمان گذر یاد می‌شد. مک الوی (McElwee, 1991) با توسعه یک روش حل مبتنی بر تکرار و سپس تهیه یک کد کامپیوتری، امکان حل معادلات غیر جبری بیر و ژاکوب را فراهم کرد. این روش و این برنامه در واقع برای یک چاه در یک آبخوان محبوس با وجود یک جریان منطقه‌ای و در شرایط پایدار، حریم آبگیر و حریم تخلیه در هر زمان را محاسبه و ترسیم می‌کرد. گروب (Grubb, 1993) یک روش حل تحلیلی برای تعیین حریم آبگیر دائمی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

یک چاه در آبخوان‌های شیب‌دار در شرایط پایدار ارائه کرد که هم در آبخوان‌های محبوس و هم در آبخوان‌های آزاد صادق است. در این روش حداکثر عرض حریم آبگیر در بالادست و فاصله نقطه سکون در پایین دست چاه به راحتی قابل محاسبه است و به روش ساده‌تری با استفاده از روش‌های تکرار امکان محاسبه مختصات حریم آبگیر (CZ) میسر است. یانگ و همکاران (Yang et al., 1995) روش حل گروب را با تکنیک ساده‌ای ارتقاء دادند تا با استفاده از آن بتوان نحوه‌ی توسعه‌ی حریم آبگیر در شرایط ناپایدار را استخراج کرد. با این روش می‌توان در یک چاه در آبخوان‌های محبوس و آزاد حریم آبگیر را در هر زمان بعد از شروع پمپاژ محاسبه و ترسیم کرد. شان (Shan, 1999) با ارائه یک روش تحلیلی برای آبخوان محبوس، امکان تعیین حریم آبگیر در شرایط پایدار برای دو چاه با فاصله اختیاری از هم را فراهم کرده است.

در سال‌های اخیر روش‌های نیمه تحلیلی متعددی برای برآورد حریم آبگیر در سیستم‌های تک چاهی و چندچاهی، با وجود شرایط مرزی مختلف ارائه شده و کدهای کامپیوتری متعددی هم در این زمینه فراهم شده است (Mahdavi, 2019; Nagheli et al., 2020; Samani and Zarei, 2015). روش‌های تحلیلی و نیمه تحلیلی مورد اشاره عمدتاً حریم آبگیر چاه را در جریان پایدار و در آبخوان همگن ارائه داده و برای ترسیم حریم آبگیر نیازمند کد نویسی و روش‌های حل تکرار هستند. از آنجایی که سامانه آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد آبرفتی به صورت گذرا بوده و با شرایط مرزی متعددی مواجه است، بنابراین استفاده از روش‌های حل مبتنی بر مدل‌های عددی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. با پیدایش و توسعه‌ی روش‌های عددی نظیر تفاضلات محدود، المانهای محدود، حجم کنترل و غیره، مدل‌های عددی متعددی برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی ایجاد و توسعه داده شده است (McDonald and Harbaugh, 1988; Langevin, 2017). نتیجه‌ی استفاده از این روش‌ها محاسبه‌ی بار هیدرولیکی در مختصات فضایی آبخوان است. پس از شبیه‌سازی جریان، تحقیقات متعددی برای امکان ردیابی ذرات در آبخوان انجام شده و نهایتاً این امکان فراهم شده است که بتوان مسیر حرکت آب از هر نقطه از آبخوان را شبیه‌سازی کرد (Pollock, 1989; Pollock, 2016). پس از شبیه‌سازی جریان توسط برنامه‌های حل عددی مانند مادفلو (Modflow) برنامه‌های ردیابی ذرات مانند مادپس (Modpath) قابلیت اجرا داشته و پس از حل به صورت پسرو (Backward) و پیشرو (Forward) قادر خواهند بود که حریم‌های آبگیر (CZ) و تخلیه (DZ) را در سیستم‌های تک چاهی یا چندچاهی مشخص کنند. تاکنون با استفاده از روش‌های مبتنی بر مدل‌های عددی تحقیقات متعددی در خصوص اثر پارامترهای مؤثر و عدم قطعیت آن‌ها انجام شده و در موارد موردی متعددی حریم حفاظت چاه (well protection zone) با توجه به حریم تخلیه (DZ) مورد ارزیابی قرار گرفته است (Rodriguez-Pretelin et al., 2022; Khalilabad, 2022; Ayinippully Nalarajan, 2022 ; Liu, 2019; Goodarzi, 2019; UKEA, 2019; Barlow et al. 2018; IGNSL, 2014; USEPA, 2008; USGS, 1991).

هدف از این پژوهش بررسی اثر پارامترهای مستقل چاه و آبخوان بر حریم آبگیر (CZ)، حریم تخلیه (DZ) و نهایتاً حریم حفاظت از چاه‌های آب در آبخوان‌های آزاد آبرفتی است؛ چرا که تاکنون به صورتی جامع از این دیدگاه به موضوع پرداخته نشده و هنوز نیازمند تحقیقات بیشتر است. از نتایج این تحقیق می‌توان دریافت که عدم ثبات یا عدم قطعیت چه پارامترهایی، اثرات بیشتری بر عدمِ اطمینانِ حریم‌های مرتبط با حفاظت از چاه‌های آب دارد و می‌بایست بیشتر مورد توجه کارشناسان مدیریت منابع آب قرار گیرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

مواد و روش‌ها

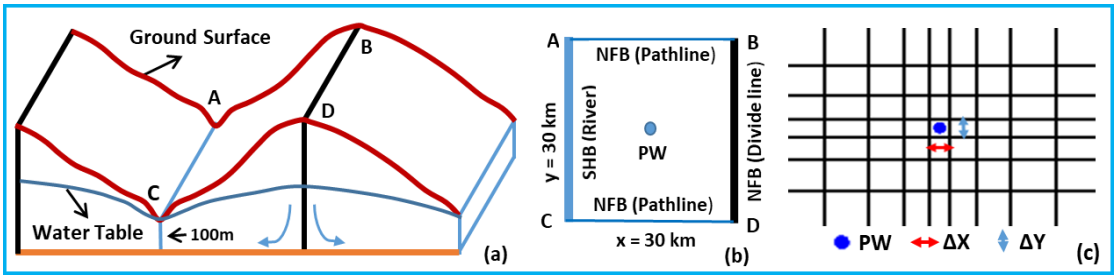
کاربرد مادفلو (Modflow) و مادپس (Modpath) در این مطالعه

مادفلو یکی از مدل‌های عددی شبیه‌سازی جریان در آب‌های زیرزمینی است که در نسخه‌های اولیه آن معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی بر اساس روش تفاضل محدود حل می‌شد ولی در نسخه‌های جدید امکان انجام محاسبات بر اساس روش‌های بیشتری به آن افزوده شده است (Langevin, 2017). در مادفلو برای اعمال شرایط مرزی خارجی و داخلی بسته‌های مختلفی ارائه شده است و با استفاده از بسته‌هایی نظیر تغذیه، تبخیر، بار مشخص، رودخانه، چاه و غیره اعمال منابع تغذیه و تخلیه با دقت مناسبی میسر است. با تعیین نسبت‌های مختلف هدایت هیدرولیکی در جهات سه‌گانه‌ی فضایی امکان اعمال ناهمسان‌گردی افقی و عمودی نیز در این مدل فراهم شده است. همچنین برای افزایش دقت در برخی از نقاط آبخوان مانند موقعیت چاه‌های آب، به روش‌های مختلف امکانات ریزسازیِ (Refined) مناسبی تعبیه شده است.

به همراه مادفلو از برنامه‌های ردیاب برای ردیابی ذرات استفاده می‌شود تا حرکت آب زیرزمینی در آبخوان از ناحیه تغذیه به منطقه تخلیه قابل ردیابی باشد. یکی از این برنامه‌ها مادپس است (Pollock, 2016). این مسیریاب از طریق دنبال کردن حرکت پسرو برای ذراتی که در چاه تعریف می‌شوند قادر است برای هر مدت از پمپاژ، حریم تخلیه (DZ) را مشخص نماید. با ترکیبی از حرکات پیشرو و پسرو می‌توان برای هر چاه حریم آبگیر (CZ) را هم مشخص کرد. با امکان پراکندگی نقاط در مختصات سه‌بعدی در هر شبکه و به تعداد زیاد دقت ترسیم خطوط تقسیم آب هم در پلان و هم در برش بسیار افزایش یافته و خطای احتمالی را می‌توان به کمتر از ۱ متر کاهش داد.

شرایط مرزی مدل طراحی شده در این مطالعه

آبخوان مورد بحث در این مطالعه یک آبخوان آزاد آبرفتی است که در حد فاصل یک خط تقسیم و یک رودخانه قرار دارد و در مرکز آن یک چاه طراحی شده است (شکل a۱). شرایط مرزی اعمال شده در مدل شامل یک مرز با بار هیدرولیکی مشخص و سه مرز با جریان مشخص صفر است (شکل b۱). ضخامت آبخوان در موقعیت رودخانه ۱۰۰ متر انتخاب شده و ابعاد آبخوان در جهت‌های x و y هر کدام ۳۰ کیلومتر انتخاب شده است. ضخامت آبخوان در جهت x بستگی به مشخصات آبخوان دارد. لذا مقدار آن از طریق شبیه‌سازی و متناسب با مشخصات آبخوان محاسبه شده است (شبیه‌سازی بدون پمپاژ). ضخامت در جهت y ثابت در نظر گرفته شده است، بنابراین از شیب رودخانه صرف‌نظر شده و به عنوان یک مرز با بار ثابت برای مدل تعریف شده است.



شکل ۱. طراحی شماتیک آبخوان فرضی مورد مطالعه و شرایط مرزی اعمال شده برای مدل مدفلو و شبکه‌بندی در محل چاه‌ها.

Fig.1. Schematic design of the hypothetical aquifer under study and the boundary conditions applied to the Modflow model and grididing at the location of the wells.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

شبکه‌بندی مدل طراحی شده در این مطالعه

در این تحقیق ابتدا اثر تعداد قابل توجهی از پارامترهای مستقل آبخوان و چاه و سپس اثر تداخل چاه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به همین علت لازم بود از ابتدا علاوه بر موقعیت چاه مرکزی، در سایر نقاطی که بعداً در آن‌ها چاه طراحی خواهد شد، از شبکه‌بندی ریز استفاده شود، به همین منظور در کل آبخوان در نقاطی به فاصله‌های ۵ کیلومتر، نقاط ریز سازی (Refine) تعریف شده است. بزرگی شبکه‌ها از ۰.۲۵ متر در موقعیت هر چاه شروع شده و تا حداکثر ۱۰۰ متر افزایش یافته است. نرخ افزایش ابعاد شبکه‌بندی هم ۱.۳ انتخاب شده است (شکل c۱).

استرس پریودهای مدل طراحی شده در این مطالعه

سطح اولیه آب در آبخوان در شروع شبیه‌سازی برای مقادیر متفاوت از هر پارامتر مورد نیاز است. لذا با توجه به دامنه تغییرات هر پارامتر، برآورد شد که برای استخراج سطح آب اولیه در انتهای دوره‌ی‌تر، می‌بایست حداقل برای ۲۰۰ سال، آبخوان بدون حضور چاه و فقط با اعمال تغذیه‌ی سطحی شبیه‌سازی شود. برای اطمینان از درستی نتایج و امکان مقایسه با روش‌های تحلیلی، ابتدا از استرس پریودهای خیلی کوتاه استفاده شده و به تدریج زمان هر استرس پریود به زمان مورد نظر در دوره‌های تر و خشک افزایش یافته است. دوره‌های خشک ۲۰۵ روزه و دوره‌های تر ۱۶۰ روزه انتخاب شده است (جدول ۱).

جدول ۱. تعداد و طول دوره‌های تنش در مدل‌های مادفلو و مادپس.

Table 1. Number and length of stress periods in Modflow and Modpath models

Stress Periods		Stress Periods	
Start	Length (d)	Start	Length (d)
0	0.000001	1	4
0.000001	0.000009	5	5
0.00001	0.00009	10	Repeat 5 to 205
0.0001	0.0009	205	160
0.001	0.009	365	205
0.01	0.09	570	160 and 205- back-to-back repeats up to 73,000
0.1	0.9	73000	

پارامترهای چاه و آبخوانِ مدل طراحی شده در این مطالعه

برای بررسی اثر هر پارامتر لازم است سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شوند. به همین منظور برای هر پارامتر یک مقدار اولیه متناسب با شرایط عمومی آبخوان‌های آزاد آبرفتی انتخاب شده و سپس در بررسی اثر هر پارامتر فقط مقدار آن در یک بازه‌ی معتبر تغییر داده شده است (جدول ۲).

جدول ۲. پارامترهای اعمال شده در مراحل شبیه‌سازی: شیب سنگ بستر (BS)، ضخامت اولیه در مرز زهکشی (IT)، تخلخل مؤثر (n)، هدایت هیدرولیکی (K)، آبدهی ویژه (Sy)، تغذیه سطحی در دوره مرطوب (Re)، تخلیه چاه (Q).

Table 2. Parameters applied in the simulation stages: BS (Bedrock Slope), IT (Initial Thickness in drainage boundry), n (effective porosity), k (hydraulic conductivity), Sy (Specific yield), Re (surface Recharge in the wet period), Q (well discharge).

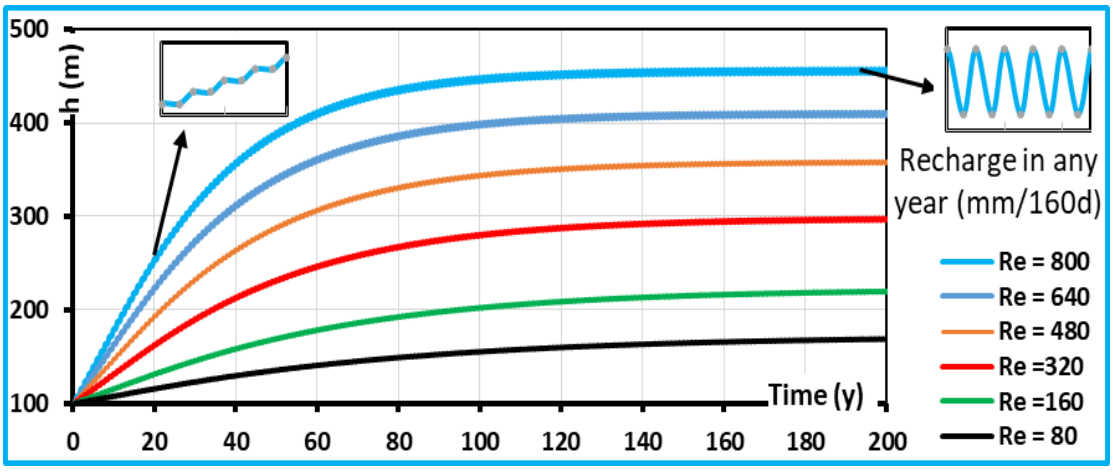
Parameter	K (m/d)	Sy	n	BS	Re (mm)	Q(m^3/d)	IT(m)
Initial bas values	10	0.10	0.10	0	320	4000	100
Limits of changes	10-100	0.01-0.10	0.01-0.10	0-0.010	40-400	1000-10000	10-100

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

سطح آب اولیه‌ی مدل طراحی شده در این مطالعه

جهت بررسی تغییرات پارامترهای چاه و آبخوان بر حریم آبگیر (CZ)، ابتدا برای حالت‌های مختلف هر پارامتر، لازم است سطح آب دینامیک پایدار طبیعی(Normal Stable Dynamic Water Table) قبل از شروع فعالیت چاه استخراج شود. منظور از سطح آب دینامیک پایدار طبیعی سطح آب اولیه‌ای از آبخوان است که به طور طبیعی قبل از شروع هرگونه پمپاژ شکل گرفته است. این سطح آب در انتهای دوره‌ی‌تر حداکثر تراز را دارد و در انتهای دوره‌ی خشک به حداقل تراز می‌رسد و از این نظر دینامیک است. این سطح آب در صورت دریافت تغذیه نسبتاً برابر در سال‌های متوالی، در دامنه‌ی کوچکی نوسان داشته و نسبتاً پایدار است. برای استخراج سطح آب نرمال اولیه برای هر مقدار از هر پارامتر، فقط آن پارامتر تغییر داده شده و سپس مدل با سطح آب اولیه‌ی ۱۰۰ متر برای کل آبخوان اجرا شده است. در سال‌های آغازین شبیه‌سازی، به طور مداوم سطح آب در آبخوان افزایش می‌یابد و این به آن معنی است که شیب هیدرولیکی آبخوان هنوز به مقدار مناسب برای ایجاد تعادل نرسیده است. پس از مدت زمانی نسبتاً طولانی در حدود ۲۰۰ سال سطح آب آبخوان به حالت نرمال رسیده و در انتهای دوره‌ی‌تر به مقدار مشخصی بالا آمده و در انتهای دوره‌ی خشک به همان مقدار پایین آمده است. پس از رسیدن به حالت تعادل، این سطح آب در پایان دوره‌ی‌تر ذخیره شده و بعداً در شبیه‌سازی چاه به عنوان سطح آب اولیه مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۲ چگونگی ایجاد سطح آب نرمال در خط تقسیم آب (خط BD شکل ۱) برای مقادیر مختلفی از تغذیه نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌شود، با افزایش تغذیه سطح تراز آب در آبخوان افزایش و ضخامت اشباع آبخوان در بالادست افزایش یافته و در تراز بالاتری تثبیت شده است.



شکل ۲. نحوه رسیدن سطح آب به حالت طبیعی در مرز سمت راست آبخوان (خط تقسیم آب در شکل ۱). Re تغذیه در دوره‌های مرطوب بر حسب میلی‌متر است.

Fig. 2. How the water level reaches the natural state on the right boundary (divided line in fig.1) of the aquifer. Re (mm) is recharge in wet periods.

بررسی صحت خروجی‌های مدل طراحی شده در این مطالعه

آبخوان مورد نظر آبرفتی آزاد است که در شرایط مختلف ناپایدار و پایدار و برای مقادیر متنوعی از پارامترهای آبخوان و چاه شبیه‌سازی شده است. صحت و دقت نتایج مدل‌های عددی به خوبی اثبات شده است (Barrash, 1997)، اما در ابتدا برای اطمینان از انتخاب درست پارامترها و شرایط مرزی و ابعاد شبکه‌بندی و غیره، می‌بایست نتایج آن با

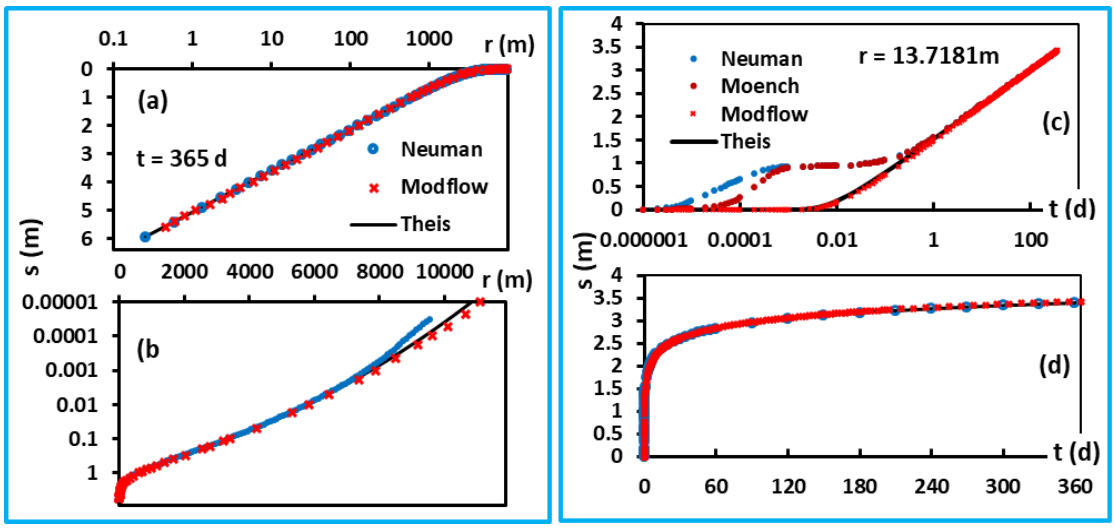
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

مدل‌های تحلیلیِ مطمئن مقایسه شده و پس از اطمینان از درستی سامانه از آن استفاده کرد. از آنجایی که فرض مدل‌های تحلیلی برای شبیه‌سازی مخروط افت، ضخامت یکسان در آبخوان است، مدل طراحی شده در این شرایط برای مرزهای بدون جریان و با ضخامت ۱۰۰ متر اجرا شد. مقایسه‌ی مقادیر افت ایجاد شده در مدل عددی با مقادیر مدل‌های تحلیلی مونچ، نیومن و تایس نشان داد که مدل عددی از دقت مناسبی برخوردار است. معادلات ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب مربوط به روش‌های مونچ، نیومن و تایس هستند، پارامترهای متعدد این روابط در مقالات مربوطه تشریح شده و برای استفاده از آن‌ها در این مطالعه یک برنامه کامپیوتری تهیه شده است (Moench, 1997; Neuman, 1974; Theis, 1935). نتایج مادفلو و روش‌های تحلیلی تا فاصله ۸ کیلومتر و تا افت ۱ میلی‌متری و از زمان ۱ روز به بعد تقریباً بر هم منطبق است (شکل ۳) .

$$\bar{h}_D(r_D,z_{D1},z_{D2},p) = \frac{1}{z_{D2}-z_{D1}}\int_{z_{D1}}^{z_{D2}} \bar{h}_D(r_D,z_D,p)\,dz_D \qquad (۱)$$

$$s(r,z,t) = \frac{Q}{4\pi T}\int_0^{\infty} 4yJ_0(y\beta^{1/2})[u_0(y)+\Sigma_{n=1}^{\infty}u_n(y)]dy \qquad (۲)$$

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T}\int_u^{\infty}\frac{e^{-x}}{x}dx \rightarrow s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T}W(u)\ ,u = \frac{r^2S}{4Tt} \qquad (۳)$$



شکل ۳. مقایسه نتایج مخروط افت در مدل عددی مادفلو و روابط تحلیلی.

Fig. 3. Comparison of the results of drawdown cone in the Modflow numerical model and analytical equations.

در حریم آبگیر (CZ) ترسیم شده توسط مدل عددی برای هر شرایط از آبخوان به سادگی امکان مشاهده و استخراج عرض حریم (y) و مختصات نقطه سکون (X_{sp}) وجود دارد (شکل ۴). در مدل‌های تحلیلی محدودیت‌های زیادی وجود دارد، اما اگر شرایط مدل عددی را بتوان تا حد امکان با این محدودیت‌های منطبق کرد، این امکان وجود خواهد داشت که نتایج آن‌ها با هم مقایسه شود. روش تحلیلی گروب (Grubb, 1993) برای شرایط پایداری است که فاقد تغذیه سطحی است و تغذیه‌ی آبخوان در آن از طریق مرز جانبی در جهت جریان تأمین می‌شود. آبخوان مورد نظر در جهت جریان به خط تقسیم منتهی شده و تغذیه در آبخوان ناشی از بارندگی و از طریق سطح صورت می‌گیرد، با این حال، امکان مقایسه وجود دارد به شرطی که به جای دبی واقعی چاه در روابط گروب از مقدار اصلاح شده‌ی آن استفاده شود. دبی واقعی خروجی از چاه معادل مجموع دبی جریان منطقه‌ای و دبی ناشی از تغذیه سطحی در مساحت داخل حریم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

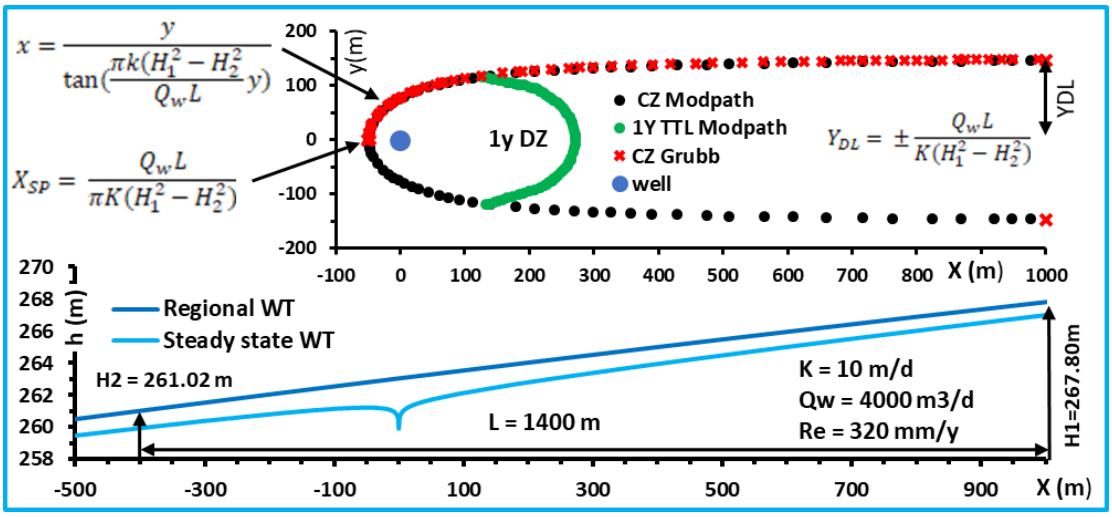
آبگیر (CZ) است. بنابراین برای محاسبه دبی اصلاح شده می‌بایست مقدار دبی ناشی از تغذیه سطحی را از دبی چاه کسر کرد. در این مطالعه برای مقادیر متفاوتی از تغذیه، مدل عددی مادفلو و مادپس اجرا شده و نتایج مختصات حریم آبگیر (CZ) در آن با نتایج روابط تحلیلی گروب (معادلات ۴ و ۵ و۶) مقایسه شده و نتایج مشابهی مشاهده شده است.

$$Y_{DL} = \pm \frac{Q_w L}{K(H_1^2 - H_2^2)} \quad (۴)$$

$$X_{SP} = \frac{Q_w L}{\pi K(H_1^2 - H_2^2)} \quad (۵)$$

$$x = \frac{y}{\tan(\frac{\pi k(H_1^2 - H_2^2}{Q_w L} y)} \quad (۶)$$

پارامترهای معادلات ۴ تا ۶ در شکل ۴ معرفی شده است. دبی ناشی از تغذیه سطحی در مثال شکل ۴ تا فاصله ۱۰۰۰ متری برابر با ۲۵۴ متر مکعب در روز است و برای استفاده از رابطه گروب این مقدار از دبی چاه کم شده است.



شکل ۴. مقایسه CZ محاسبه شده از مادفلو و مادپس با روش گروب. 1y DZ یک منطقه تخلیه یک ساله بر اساس خط زمان گذر یک‌ساله است. فقط نیمی از نقاط روش گراب نشان داده شده است.

Fig. 4. Comparison of CZ calculated from Modflow and Modpath with grubb method. 1y DZ is a one-year Discharge Zone based on a 1-year Travel Time Line. Only half of the points of the Grubb method are shown.

حریم تخلیه (DZ) حجمی از آبخوان در اطراف چاه است که در مدت پمپاژ آب آن تخلیه شده و با آب نقاط دورتر جایگزین می‌شود. در مورد چاه‌های با نفوذ کامل مساحت سطح آن از رابطه ۷ قابل محاسبه است. حد پایین این مساحت در مورد زمان‌های طولانی، مرز حریم آبگیر (CZ) است. با معلوم بودن مساحت و مرز حریم آبگیر (CZ) می‌توان حد بالایی آن را تخمین زد. در مادپس (Modpath) با ترسیم خط زمان گذر (TTL) برای هر مدت از پمپاژ به روش پسرو موقعیت حریم تخلیه مشخص می‌شود (شکل ۴).

$$Q_W \times t = A_{plan} \times \bar{b} \times N_{effective} + A_{plan} \times Re \quad (۷)$$

Q_w دبی چاه، t زمان پمپاژ، A_{plan} مساحت سطحی حریم تخلیه، b ضخامت متوسط آبخوان در اطراف چاه، Re تغذیه سطحی و N تخلخل مؤثر است که در مورد آبخوان آزاد معادل آبدهی ویژه (Sy) خواهد بود. در مثال شکل ۴ مساحت حریم تخلیه (DZ) یک ساله حاصل از نتیجه‌ی مادپس (Modpath) حدوداً ۵۵۰۰۰ متر مربع است که با مقدار محاسبه شده از رابطه ۷ برابر است.

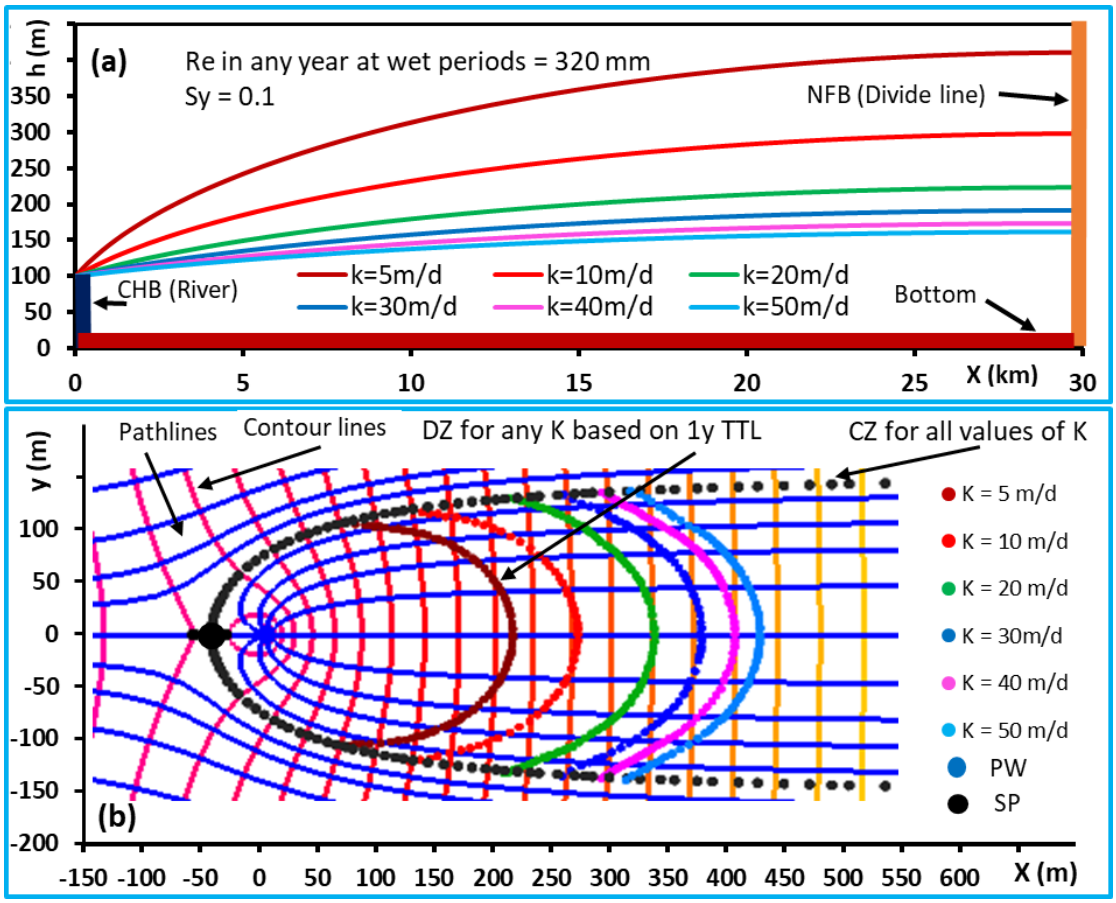
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

نتایج و بحث

به منظور بررسی اثرات چاه و آبخوان بر حریم آبگیر (CZ) و حریم تخلیه (DZ) در آبخوان آزاد آبرفتی برای شرایط پایدار و ناپایدار، ابتدا برای هر مقدار از هر پارامتر سطح آب نرمال استخراج شده است. برای استخراج سطح آب نرمال، شبیه‌سازی جریان بدون اعمال چاه آنقدر ادامه یافته که سطح آب در آبخوان به تعادل رسیده و مقدار فراز و فرود آن در دوره‌های تر و خشک برابر شده است (بیش از ۲۰۰ سال). سپس سطح آب در پایان دوره‌ی‌تر ذخیره شده و در شبیه‌سازی چاه به عنوان سطح آب اولیه مورد استفاده قرار گرفته است. پس از استخراج سطح آب نرمال، ابتدا چگونگی تغییرات در تراز سطح آب (H)، ضخامت اشباع (b)، شیب هیدرولیکی (I)، ضریب انتقال (T) و غیره تشریح شده و سپس شبیه‌سازی چاه در آبخوان در مدت ۱۰۰ سال انجام شده است. نهایتاً پس از شبیه‌سازی چاه، چگونگی تغییرات حریم آبگیر (CZ) و حریم تخلیه (DZ) توضیح داده شده است.

بررسی اثر هدایت هیدرولیکی (k) بر سطح آب و حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان آزاد آبرفتی

با اعمال مقادیر پارامترهای پایه و فقط تغییر K (جدول ۲ بدون اعمال چاه) ، آبخوان شبیه‌سازی شده و سطح آب نرمال در پایان دوره‌ی‌تر برای هر مقدار از K استخراج شده است. همچنان که انتظار می‌رود در مقادیرِ زیادِ K، مقدار H کمتر، مقدار b کمتر، مقدار I کمتر ولی مقدار T به شدت افزایش یافته است(شکل 5a).



شکل ۵. اثر هدایت هیدرولیکی (K): (a) سطح آب نرمال در پایان دوره‌ی‌تر. (b) حریم آبگیر و حریم تخلیه. خطوط زمان گذر یک ساله هستند.

Fig. 5. The effect of hydraulic conductivity (K): (a) Normal water level at the end of the wet period. (b) Capture Zone and Discharge Zone. Travel time lines are for 1 year.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

با ثابت نگه داشتن مشخصات پایه در آبخوان و تغییر تدریجی K و در هر K استفاده از سطح آب نرمال مربوطه، شبیه‌سازی چاه انجام شده است. از آنجایی که سطح آب در آبخوان پس از پمپاژ چاه خیلی سریع و در کمتر از یک روز به سطح نرمال جدیدی می‌رسد، لذا شبکه جریان ایجاد شده در پایان اولین دوره خشک ۲۰۵ روزه تا انتهای دوره ۱۰۰ ساله ثابت باقی می‌ماند و فقط در دوره‌های تر و خشک، ارقام ارتفاعی منحنی‌های تراز در آن‌ها متفاوت است. چنین وضعیتی باعث ثابت نگه داشته شدن مسیر حرکت آب در آبخوان می‌گردد. پس از شبیه‌سازی جریان با مدلِ مادفلو، با انتخاب تعداد مناسبی ذره در چاه و در بلوک‌هایی از آبخوان که در بالادست چاه قرار دارند و سپس اجرای مدل مادپس در وضعیت پسرو و پیشرو، یک خط تقسیم محلی در اطراف چاه که خطوط جریان آن به داخل چاه ختم می‌شوند قابل شناسایی است. موقعیت این خط تقسیم محلی همان CZ است (شکل5b). با اجرای فرم پسرو در ذرات داخل چاه برای یک مدت مشخص، خط زمان گذر (TTL) برای آن مدت در اطراف چاه ترسیم می‌گردد که حجم داخل آن معرف همان DZ است. موضوع قابل توجه در تحلیل اثرات K در آبخوان‌های آزاد آبرفتی آن است که با تغییر K وسعت سطحی CZ ثابت باقی می‌ماند. در توجیه چنین وضعی می‌توان گفت که در آبخوان آزاد b و I مستقل نبوده و خود تابع K هستند. بنابراین به نظر می‌رسد که به ازای مقادیر متفاوت K، همواره حاصل‌ضرب این سه پارامتر مقدار واحدی است. در مورد DZ با افزایش K وسعت سطحی آن افزایش یافته است (شکل5b). علت چنین وضعیتی کاهش b در مقادیر زیاد K است (شکل 5a).

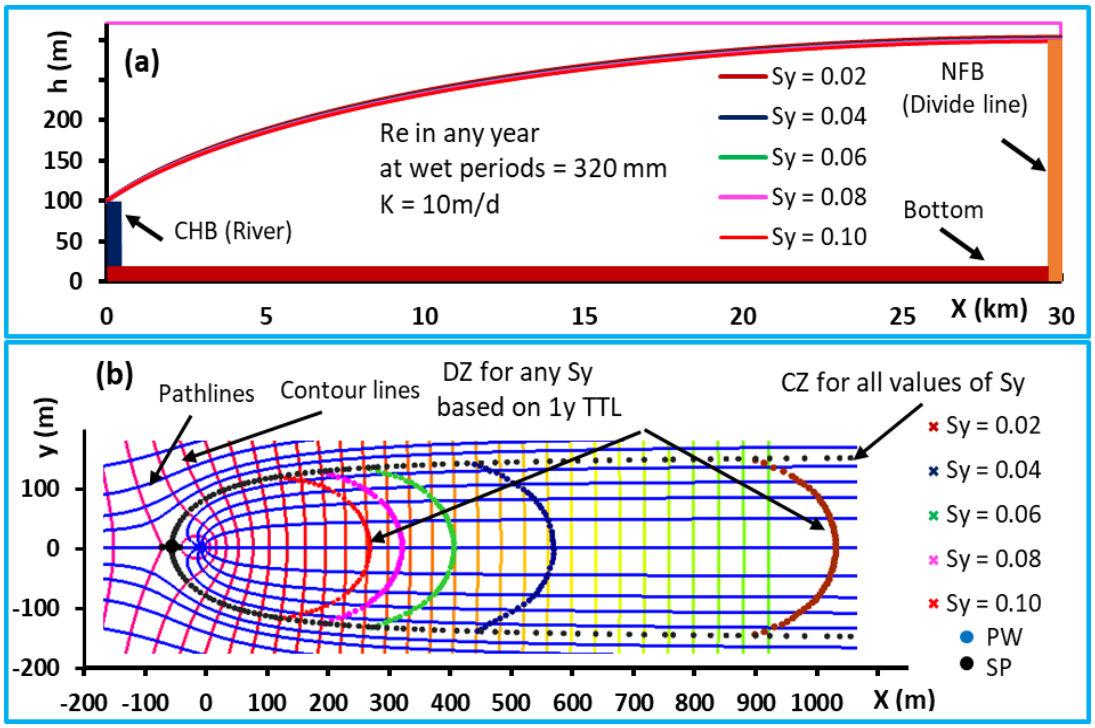
بررسی اثر آبدهی ویژه (Sy) بر سطح آب و حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان آزاد آبرفتی

با اعمال مقادیر پارامترهای پایه و فقط تغییر Sy (جدول ۲ بدون اعمال چاه) ، آبخوان شبیه‌سازی شده و سطح آب نرمال برای هر مقدار از Sy استخراج شده است (شکل 6a). در مقادیر متفاوت Sy تراز سطح آب نرمال ثابت بوده و تغییرات محسوسی نداشته است. این بدان معنی است که در آبخوان‌های مشابه و فقط با مقادیر متفاوت از Sy، مقادیر b، T و I یکسان است. گرچه سطح آب نرمال در مقادیر متفاوت Sy برابر است اما زمان رسیدن به پایداری در آبدهی‌های بالا خیلی بیشتر است و طبیعتاً در زمان پمپاژ در زمان‌های طولانی‌تری سطح آب آن افت خواهد کرد.

با ثابت نگه داشتن مشخصات اولیه در آبخوان و تغییر تدریجی Sy و استفاده از سطح آب نرمال مربوطه در هر Sy، همانند مرحله هدایت هیدرولیکی، شبیه‌سازی چاه انجام شد. با اعمال هر مقدار Sy، شبکه جریان در زمان‌های مختلف استخراج و مشخص شد که از ۱ روز به بعد، مسیر جریان در تمام ۱۰۰ سال شبیه‌سازی یکسان است. برای مقادیر مختلف Sy، موقعیت‌های CZ و DZ استخراج و ترسیم شد (شکل 6b). موضوع قابل توجه آن است که با وجود تأثیرات زیاد Sy بر روی مخروط افت، اما موقعیت CZ در تمام مقادیر Sy یکسان است. وسعت DZ در ظاهر مستقل از Sy است زیرا به حجم آب در تخلخل آبخوان، در بخش همیشه اشباع مربوط است. اما از آنجایی که Sy در آبخوان آزاد تابعی از تخلخل و برابر با تخلخل مؤثر (ne) است، بنابراین در مدل مادپس از همان مقدار Sy برای ne استفاده می‌شود. بنابراین تغییرات ne همراه با تغییرات Sy نشان داده می‌شود. طبیعی است که با افزایش ne یا Sy، مساحت پلان DZ کاهش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]



شکل ۶. اثر آبدهی ویژه (Sy): (a) سطح آب نرمال در پایان دوره‌ی‌تر. (b) حریم آبگیر و حریم تخلیه. خطوط زمان گذر یک ساله هستند.

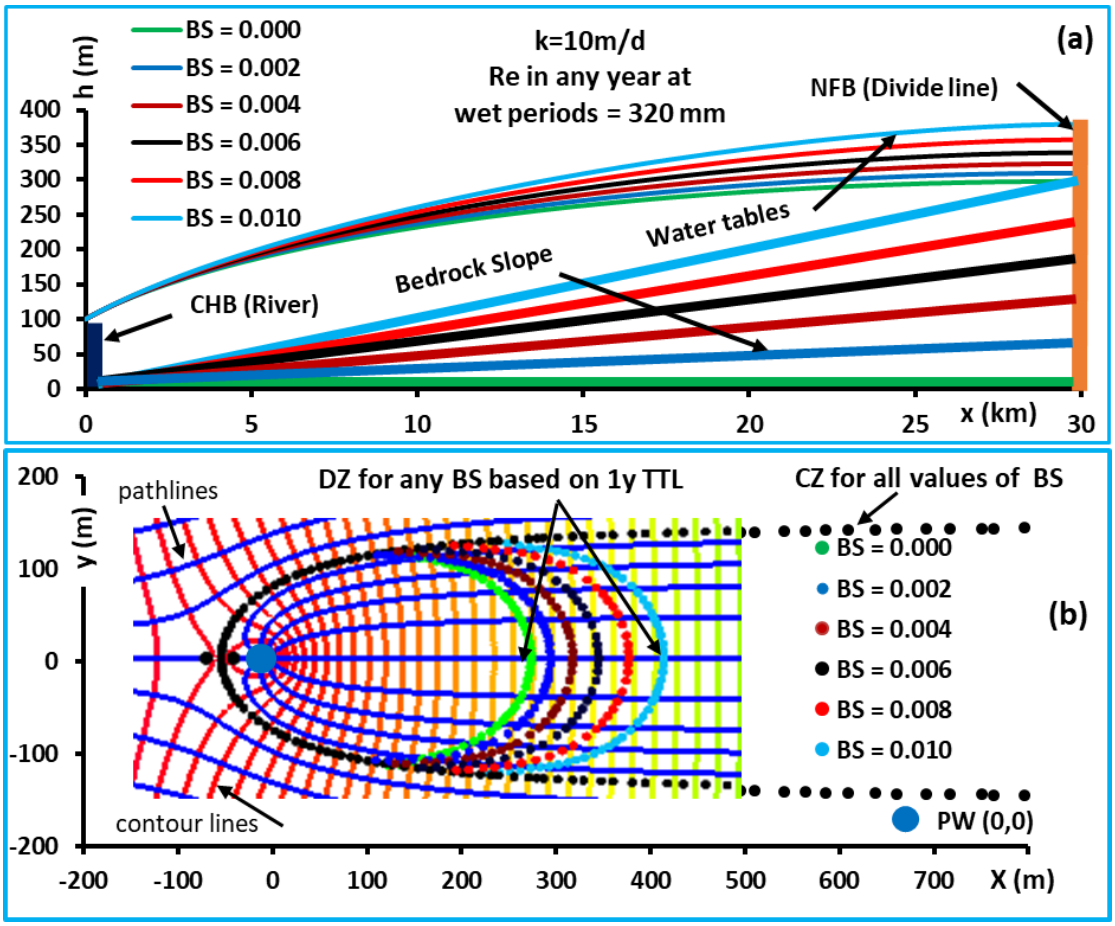
Fig. 6. The effect of specific yield: (a) Normal water level at the end of the wet period. (b) Capture Zone and Discharge Zone. Travel time lines are for 1 year.

بررسی اثر شیب سنگ کف (BS) بر سطح آب و حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان آزاد آبرفتی

انتظار می‌رود که با افزایش BS، تراز سطح آب (H) در بالادستِ آبخوان به همان نسبت زیاد و ضخامت آبخوان (b) کاهش چشمگیری نداشته باشد، اما آنچنان که در شکل 7a مشاهده می‌شود افزایش BS عمدتاً باعث کاهش قابل توجه در مقدار b در بالادست شده است. بنابراین با افزایش BS از b کاسته شده، T کاهش یافته ولی I افزایش متوسطی داشته است. بررسی سطح آب نرمال در این وضعیت نشان دهنده این است که تقریباً امکان تشکیل یک آبخوان آزاد با ضخامت یکسان وجود ندارد، اما برای بررسی خصوصیات آبخوان‌هایی با ضخامت تقریباً یکنواخت می‌توان تا حدودی با تغییر BS چنین شرایطی را ایجاد کرد (شیب 0.008 در شکل 7a).

با ثابت نگه داشتن پارامترهای پایه و تغییر BS و در هر مرحله استفاده از سطح آب نرمال مربوطه (شکل 7a)، نتیجه‌ی محاسبات CZ و DZ در مدت ۱۰۰ سال شبیه‌سازی، به صورت شکل 7b حاصل شده است. در مقادیر مختلف BS شبکه جریان ثابت بوده و موقعیت CZ یکسان است. به نظر می‌رسد که همانند آنچه در تغییرات K مشاهده شد، در این حالت هم همواره حاصل‌ضرب مقادیر KbI ثابت بوده و به همین دلیل وسعت CZ در مقادیر مختلف BS تغییر نکرده است. در مورد DZ با افزایش BS وسعت آن افزایش یافته و علت آن کاهش b است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]



شکل ۷. اثر شیب سنگ کف (BS): (a) سطح آب نرمال در پایان دوره‌ی‌تر. (b) حریم آبگیر و حریم تخلیه. خطوط زمان گذر یک ساله هستند.

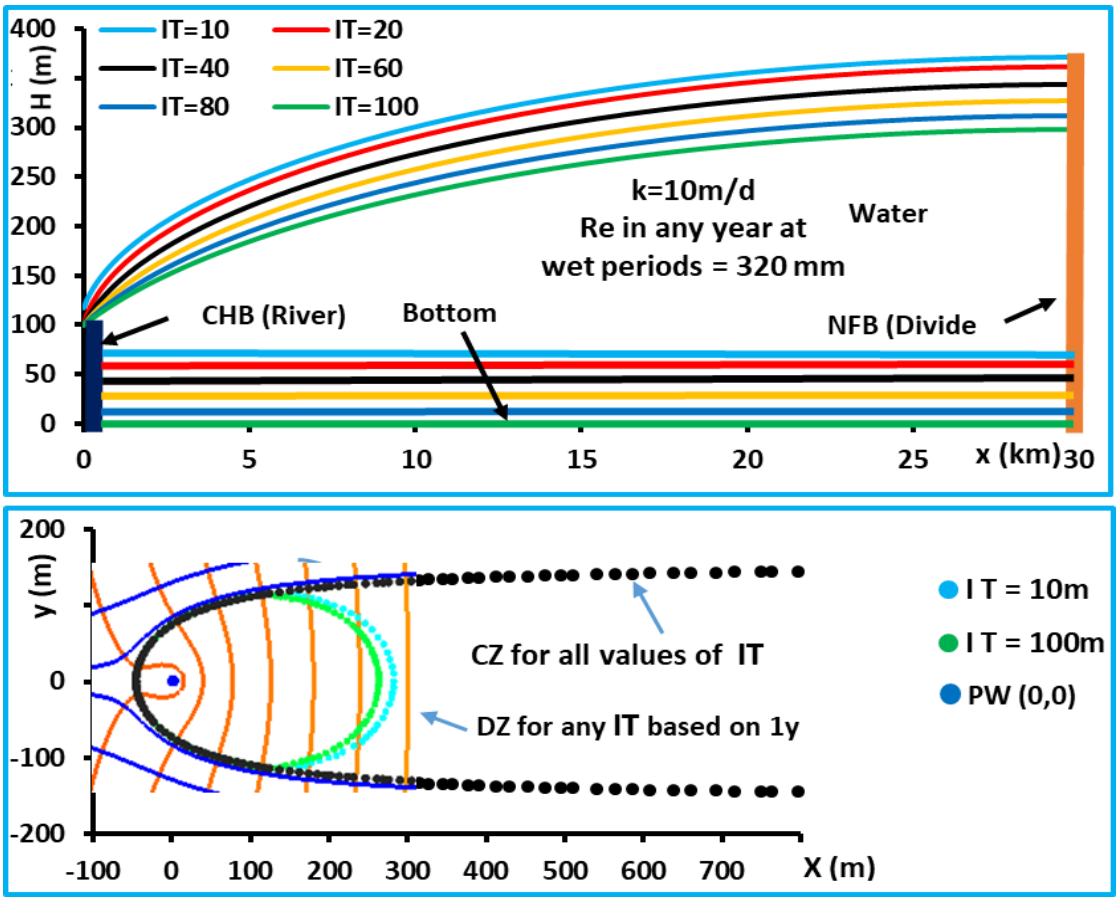
Fig. 7. The effect of bedrock slope (BS): (a) Normal water level at the end of the wet period. (b) Capture Zone and Discharge Zone. Travel time lines are for 1 year.

بررسی اثر ضخامت اولیه در مرز آبی (IT) بر سطح آب و حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان آزاد آبرفتی

ضخامت اولیه در مرز آبی ۱۰۰ متر است، بنابراین مرز رودخانه در شبیه‌سازی دارای بار ثابت ۱۰۰متر است، اما در مرز بالادست با تغذیه سطحی سطح تراز آب افزایش یافته و پس از ایجاد تعادل، در یک سطح نرمال نوسان خواهد داشت. جهت بررسی اثر IT، شبیه‌سازی آبخوان در مقادیر پارامترهای پایه (جدول ۲ بدون اعمال چاه) انجام شد. در چند مرحله تراز بستر آبخوان تغییر داده شد تا IT در مرز رودخانه به تدریج از ۱۰۰ متر به ۱۰ متر کاهش یابد. با تغییر تراز بستر و کاهش IT، مقدار I و H افزایش یافت، و این افزایش خصوصاً در مورد شیب هیدرولیکی در نزدیک مرز رودخانه بیشتر از بالادست بود (شکل 8a).

پس از اعمال سطح آب نرمال و شبیه‌سازی چاه، با تغییر IT وسعت CZ تغییر نکرد. با کاهش IT، نهایتاً b به تدریج مقدار اندکی کاهش یافت و لذا مقدار خیلی اندکی وسعت DZ افزایش پیدا کرد (شکل 8b).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]



شکل ۸. اثر ضخامت اولیه در مرز زهکشی (IT): (a) سطح آب نرمال در پایان دوره‌ی‌تر. (b) حریم آبگیر و حریم تخلیه. خطوط زمان گذر یک ساله هستند.

Fig. 8. The effect of Initial Thickness in drainage boundary: (a) Normal water level at the end of the wet period. (b) Capture Zone and Discharge Zone. Travel time lines are for 1 year.

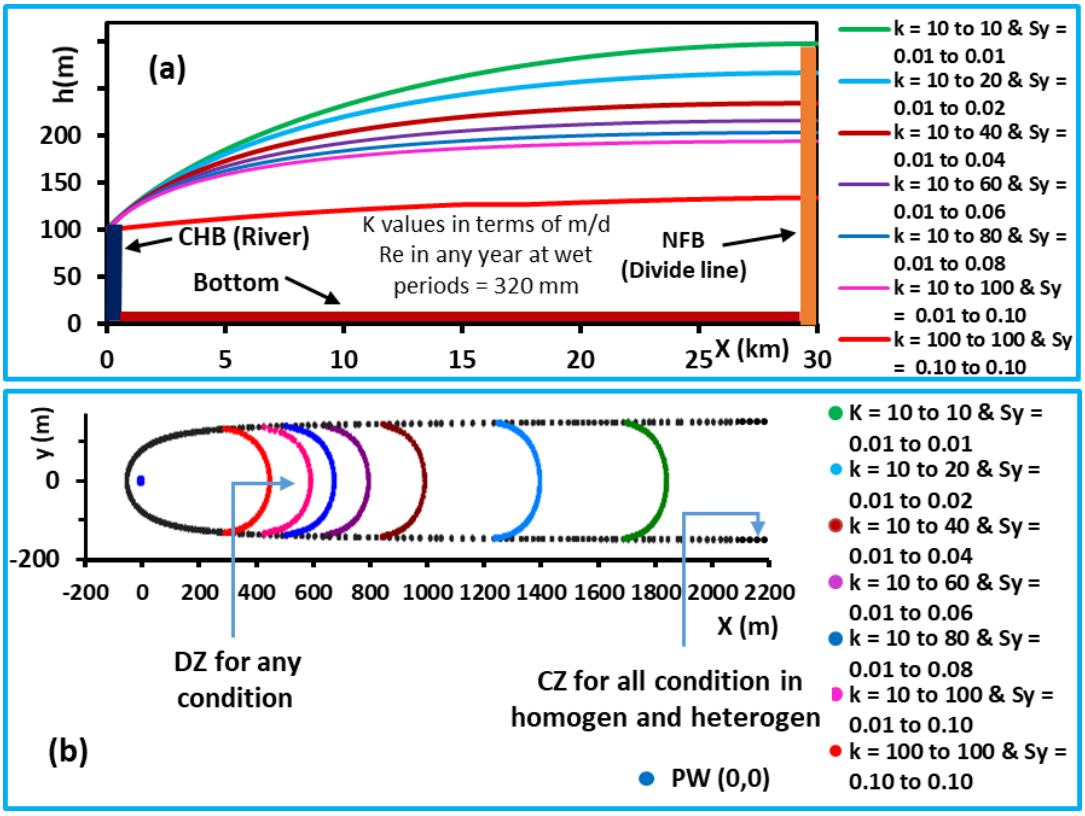
بررسی اثر ناهمگنی بر سطح آب و حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان آزاد آبرفتی

آبخوان‌های آزاد آبرفتی عمدتاً مخروط افکنه‌ها هستند و قاعدتاً در بالادست دانه درشت و به تدریج در جهت پایین دست درصد رسوبات ریزدانه در آن‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین ناهمگنی در این آبخوان‌ها طبیعی است. مقدار ناهمگنی بسته به سنگ منشاء و دیگر شرایط زمین‌شناختی متغیر است. اصولاً انتظار می‌رود که در ناهمگنی مقادیر K و Sy با هم به صورت هماهنگ تغییرات تدریجی داشته باشند. در این مطالعه برای ایجاد ناهمگنی، پارامترهای مذکور به صورت خطی از مرز رودخانه تا مرز تقسیم آب به تدریج افزایش داده شده‌اند. در هر مرحله مقدار حداقل پارامتر در پایین دست و مقدار حداکثر پارامتر به بالادست داده شده و سپس سطح آب نرمال در پایان دوره‌ی‌تر استخراج شده است (شکل 9a). با افزایش ناهمگنی b کاهش، I کاهش و T با شدت بیشتری افزایش یافت.

از آنجایی که ناهمگنی تابعی از K و Sy است، انتظار می‌رود که تغییرات CZ و DZ در این مورد همانند تغییرات در K وSy باشد. همچنان که در شکل 9b مشاهده می‌شود CZ در مقادیر مختلف ناهمگنی بر CZ در مقادیر مختلفی از ضرایب هیدرودینامیک همگن منطبق است. این وضعیت نشان دهنده‌ی این واقعیت است که حاصل‌ضرب kbi در شرایط همگن و ناهمگن در آبخوان آزاد آبرفتی به گونه‌ای است که همواره یک CZ مشابه را تولید می‌کند. DZ نیز تابع n_e یا همان Sy است و با افزایش ناهمگنی کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش ناهمگنی در Sy، مقدار آن از مرز

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

رودخانه تا مرز تقسیم آب به گونه‌ای افزایشی است و طبیعی است که با افزایش n_e و Sy در محل چاه، DZ کوچک‌تر می‌شود (شکل 9b).



شکل ۹. اثر ناهمگنی: (a) سطح آب نرمال در پایان دوره‌ی‌تر. (b) حریم آبگیر و حریم تخلیه. خطوط زمان گذر یک ساله هستند.

Fig. 9. The effect of heterogeneity: (a) Normal water level at the end of the wet period. (b) Capture Zone and Discharge Zone. Travel time lines are for 1 year.

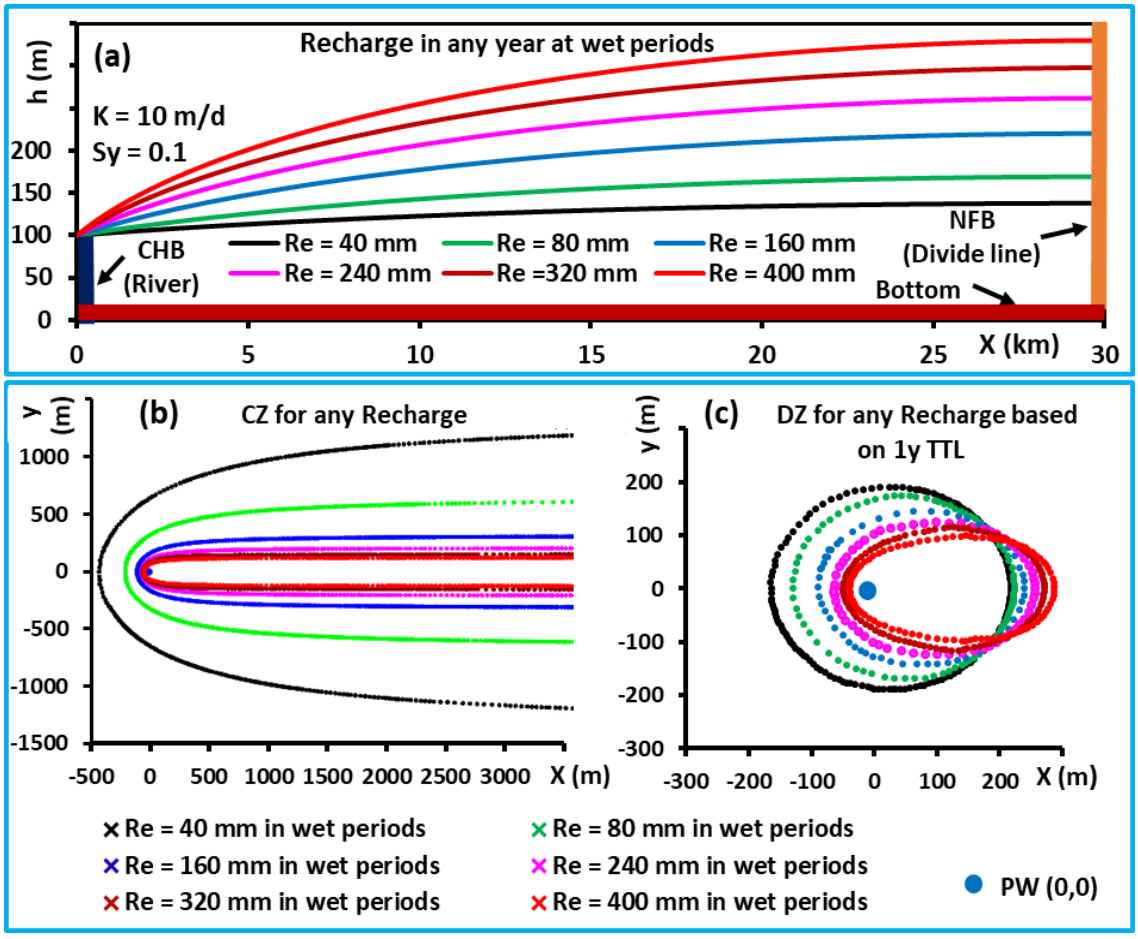
بررسی اثر تغذیه سطحی (Re) بر سطح آب و حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان آزاد آبرفتی

وقتی شبیه‌سازی یک آبخوان آزاد آبرفتی تا مرز تقسیم آب در بالادست ادامه می‌یابد، منبع اصلی تغذیه‌ی آبخوان، نفوذ سطحی از جمله نفوذ بارش در دوره‌های مرطوب خواهد بود. موقعیت مرز خط تقسیم آب به موقعیت مرزهای تخلیه از جمله رودخانه‌ها، چشمه‌ها و غیره بستگی دارد، اما سطح تراز آن (H) به شدت به مقدار Re سالانه بستگی دارد. در مقادیر زیاد Re ، آبخوان برای امکان تخلیه‌ی طبیعی خود ناچار به افزایش H و ایجاد مقدار بیشتری I است. همانند آنچه در مورد پارامترهای قبلی ذکر شد برای هر مقدار از Re، موقعیت سطح آب نرمال در پایان دوره‌ی‌تر استخراج شده است (شکل 10a). همچنان که مشاهده می‌شود با افزایش Re موقعیت سطح آب نرمال در بالادست در تراز بالاتری قرار می‌گیرد و به این ترتیب H ، b ، T و I در آبخوان افزایش می‌یابد.

با شبیه‌سازی جریان و سپس ردیابی ذرات برای مقادیر متفاوت Re، وسعت CZ و DZ استخراج شده است (شکل 10b). در مقادیر کم Re، به شدت بر وسعت CZ افزوده شده و فاصله نقطه سکون (Stagnation Point) از چاه به شدت افزایش یافته است (شکل 10b). از آنجایی که با افزایش Re، مقدار b و I افزایش می‌یابد لذا برای تأمین آب چاه، پهنای کمتری از آبخوان مورد نیاز است. بنابراین با افزایش Re وسعت CZ کاهش می‌یابد. در مبحث مربوط به هدایت هیدرولیکی نیز تغییر ضخامت و گرادیان هیدرولیکی وجود داشت ولی در آنجا همواره حاصل‌ضرب KIb مقداری ثابت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

بود. اما در تغییرات تغذیه، از آنجایی که مقدار هدایت هیدرولیکی ثابت است، لذا حاصل‌ضرب KIb ثابت نیست، به همین دلیل تغییر Re باعث تغییر CZ می‌شود. شکل 10c وسعت DZ را برای زمان گذر یک ساله نشان می‌دهد، در تغذیه‌های زیاد به دلیل شیب زیاد، DZ به سمت بالادست کشیده شده و به دلیل ضخامت زیادِ آبخوان وسعت آن کوچک‌تر شده است. در تغذیه‌های کم به دلیل نزدیک بودن سطح آب به حالت افقی، DZ در همه‌ی جهات توسعه یافته و در پلان دایره‌ای‌تر و به دلیل ضخامتِ کمِ آبخوان وسعت آن هم بیشتر است.



شکل ۱۰. اثر تغذیه سطحی (Re): (a) سطح آب نرمال در پایان دوره‌ی‌تر. (b) حریم آبگیر. (C) حریم تخلیه. خطوط زمان گذر یک ساله هستند.

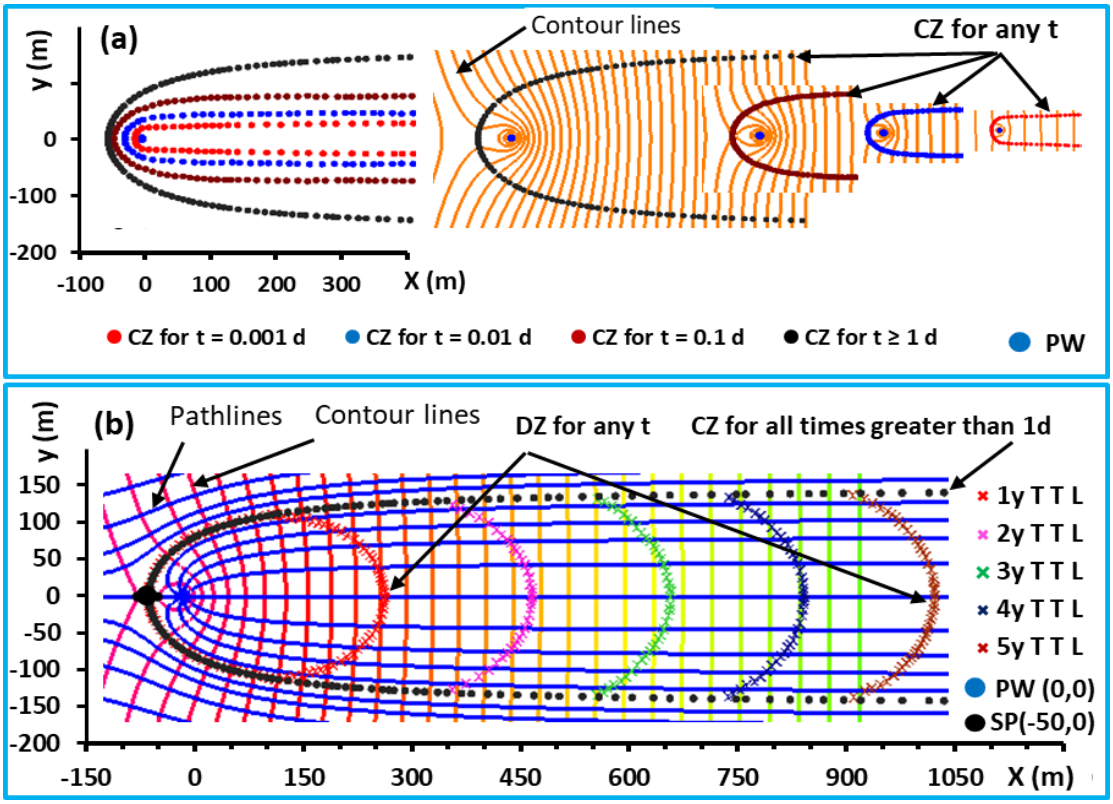
Fig. 10. The effect of Recharge (Re): (a) Normal water level at the end of the wet period. (b) Capture Zone. (C) Discharge Zone. Travel time lines are for 1 year.

بررسی اثر تداوم پمپاژ (t) بر سطح آب و حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان آزاد آبرفتی

در لحظات اولیه‌ی شروع پمپاژ، ابتدا افت قابل توجهی در مجاورت چاه ایجاد شده و چاه فقط خطوط جریان بخش کوچکی از آبخوان را به خود جذب می‌کند. با افزایش مدت پمپاژ، ابتدا با گسترش مخروط افت در اطراف چاه بر وسعت خطوط جریان جذب شده افزوده می‌شود. با افزایش زمان‌های بیشتر و علی‌رغم تداوم گسترش مخروط افت در فواصل دورتر، اما وسعت خطوط جریان منتهی به چاه افزایش نمی‌یابد و حریم آبگیر کماکان ثابت باقی می‌ماند (شکل 11a).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

در این مطالعه به ازای مقادیر اولیه مشخصات چاه و آبخوان(جدول ۲)، مدت شبیه‌سازی ۱۰۰ سال تداوم یافته است اما CZ ایجاد شده برای زمان‌های بیشتر از یک روز تا انتهای فصل خشک و در ادامه تا انتهای فصل‌تر ثابت بوده و تغییر نکرده است. توجیه این وضعیت به این صورت است که پس از ایجاد یک خط تقسیم محلی در موقعیت CZ ، گسترش مخروط افت به گونه‌ای است که در این خط و دو طرف آن، نرخ رشد افت‌ها آنچنان ثابت باقی می‌ماند که با تداوم پمپاژ موقعیت این خطِ تقسیم همچنان ثابت می‌ماند. طبیعی است که با افزایش زمان پمپاژ، حجم بیشتری از آب مجاور چاه تخلیه و جایگزین شده و بنابراین DZ توسعه می‌یابد (شکل 11b). در زمان‌های کم، DZ هم در جهت بالادست و هم در جهت پایین دست توسعه می‌یابد اما پس از آنکه گسترش آن به نقطه سکون رسید در جهت پایین دست گسترش آن متوقف می‌شود. لازم به ذکر است که در مورد سیستم‌های چندچاهی، مدت زمان طولانی‌تری لازم است تا سطح آب آبخوان پس از اعمال چاه‌ها به سطح تعادل جدیدتری برسد، در این مورد تا مدت بیشتری، CZ همچنان در حال گسترش است اما پس از آنکه سطح آب در آبخوان به سطح آب استاتیک دینامیک جدیدی مشابه با سطح آب نرمال رسید، گسترش آن متوقف می‌شود.



شکل ۱۱. اثر تداوم پمپاژ (t): (a) چگونگی گسترش حریم آبگیر. (b) چگونگی گسترش حریم تخلیه. خطوط زمان گذر یک ساله هستند.

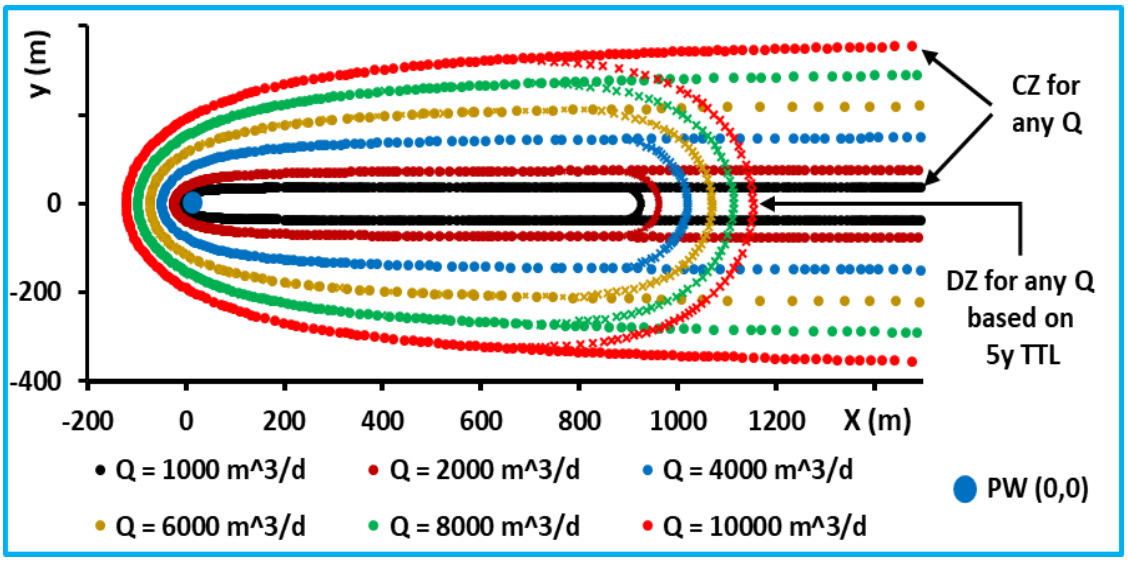
Fig. 11. The effects of pumping duration: (a) the expansion mechanism of the capture zone. (b) the expansion mechanism of discharge zone. Travel time lines are for 1 year.

بررسی اثر دبی پمپاژ (Q) بر سطح آب و حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان آزاد آبرفتی

با انتخاب یک سطح آب نرمال و مقادیری از پارامترهای آبخوان که آن را ایجاد کرده است می‌توان اثر تغییرات Q بر حریم CZ و DZ را بررسی کرد. با اعمال پارامترهای پایه (جدول۲) به آبخوان و با تغییر ۱۰ مرتبه‌ای در Q، اثرات آن

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

محاسبه و در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با افزایش Q، مخروط افت با شدت بیشتری گسترش یافته و خطوط جریان بیشتری را به سوی خود جذب می‌کند. همچنان که انتظار می‌رود با افزایش Q، وسعت CZ در جوانب بیشتر شده و نقطه سکون آن به سمت پایین دست جابجا شده است. بر اساس روابط تحلیلی پهنای CZ با Q رابطه‌ای مستقیم دارد، بنابراین با افزایش دو برابری Q، پهنای CZ هم دو برابر می‌شود. از آنجایی که با افزایش Q حجم آب تخلیه شده از آبخوان افزایش می‌یابد به همان نسبت وسعت DZ هم زیاد می‌گردد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. حریم آبگیر و حریم تخلیه برای مقادیر مختلف دبی پمپاژ. خطوط زمان گذر ۵ ساله هستند.

Fig. 12. Capture Zone and discharge zone for different amounts of pumping discharge. Travel time lines are for 5 years.

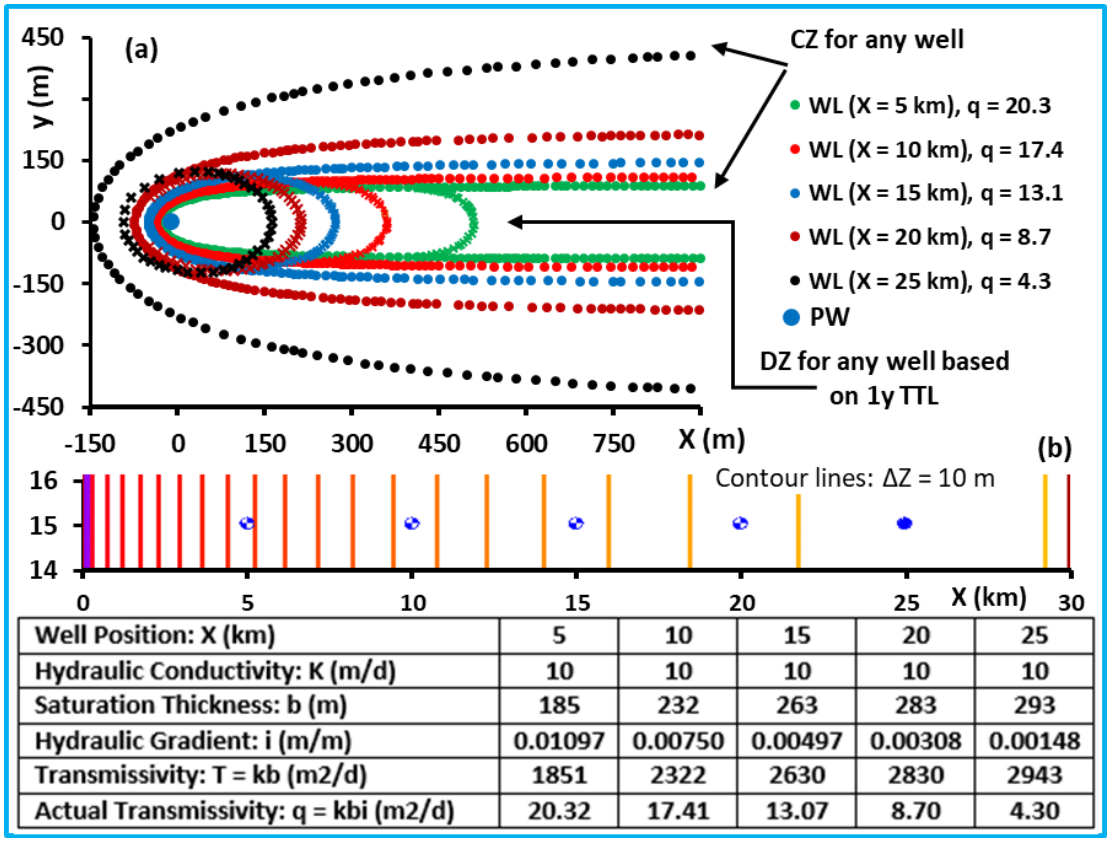
بررسی اثر موقعیت چاه (WL) بر سطح آب و حریم آبگیر و حریم تخلیه در آبخوان آزاد آبرفتی

در آبخوان‌های آزاد گرادیان هیدرولیکی (I) پارامتر مستقلی نیست و در این مورد نمی‌توان اثرات I را در یک نقطه از آبخوان ارزیابی کرد. گرچه برای بررسی مخروط افت در مدتی محدود (در حد یک دوره تر یا خشک) می‌توان سطح آبی موازی با سطح بستر آبخوان تعریف کرد اما در مورد CZ که با زمان‌های طولانی مرتبط است انتخاب یک سطح آب با شیب یکنواخت با واقعیت سازگار نیست. در آبخوان‌های آزاد معادله‌ی سطح آب در حد فاصل خط تقسیم تا مناطق تخلیه مانند رودخانه، سهموی است و I در مناطق تخلیه زیاد است (شکل ۱ و شکل 13b). از آنجایی که I در محدوده‌ی مخروط افت یکنواخت نیست نمی‌توان بررسی اثر چاه در مکان‌های مختلف بین خط تقسیم تا رودخانه را به یک I نسبت داد. از طرفی همچنان که تاکنون دیده شد تغییر دیگر پارامترها در آبخوان هم باعث تغییر I می‌شود. بنابراین در آبخوان‌های آزاد می‌توان به جای عنوان بررسی اثر I از عنوان بررسی اثر موقعیت (WL) استفاده کرد تا با دیگر عوامل تأثیرگذار بر I تداخل مبحث صورت نگیرد. به این منظور با حفظ مشخصات پایه (جدول ۲) و فقط با تغییر موقعیت چاه در جهت محور x ، اثر موقعیت چاه که به نوعی ترکیبی از اثر b و I است مورد ارزیابی قرار گرفته و در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

در مشخصات پایه مقدار تغذیه ۳۲۰ میلی‌متر است بنابراین در بررسی موقعیت چاه از سطح آب نرمال مربوط به آن استفاده شده است (شکل 10a). با افزایش مختصات در جهت x ، علی‌رغم افزایش b اما به دلیل کاهش چشمگیر I، در نهایت حاصل‌ضرب KIb کاهش یافته و لذا وسعت CZ افزایش یافته است. اما به دلیل افزایش b با افزایش مختصات در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

جهت x، از وسعت DZ کاسته شده است. همچنان که انتظار می‌رود با کاهش q به سمت بالادست که حاصل‌ضرب kbi است، پهنای CZ افزایش یافته است. برخلاف انتظار با افزایش T به سمت بالادست، بر پهنای CZ افزوده شده است. این رویداد به دلیل اثرِ زیادِ متغیر وابسته‌ی I است. T معرف قابلیت انتقال آبخوان تحت شیب هیدرولیکی واحد است اما q در واقع معرف قابلیت انتقال آبخوان تحت شیب هیدرولیکی واقعی است. بنابراین در موضوع CZ در آبخوان آزاد آبرفتی می‌بایست به جای بررسی اثر پارامتر T، اثر پارامتر q بررسی شود تا فهم چگونگی تغییرات آن ساده‌تر باشد. q تحت عنوان دبی در واحد عرض شناخته می‌شود اما با توجه اثر و دیمانسیون آن، بهتر است از عنوان قابلیت انتقال واقعی برای آن استفاده گردد. از آنجایی که مقدار q به موقعیت چاه که یک متغیر مستقل است بستگی دارد، لذا تحت این عنوان بررسی شده است.



Well Position: X (km)	5	10	15	20	25
Hydraulic Conductivity: K (m/d)	10	10	10	10	10
Saturation Thickness: b (m)	185	232	263	283	293
Hydraulic Gradient: i (m/m)	0.01097	0.00750	0.00497	0.00308	0.00148
Transmissivity: T = kb (m2/d)	1851	2322	2630	2830	2943
Actual Transmissivity: q = kbi (m2/d)	20.32	17.41	13.07	8.70	4.30

شکل ۱۳. (a) حریم آبگیر و حریم تخلیه برای موقعیت چاه در جهت جریان از مرز تخلیه تا مرز تقسیم. (b) موقعیت چاه‌ها در عرض ۱۵ کیلومتری. خطوط زمان گذر ۱ ساله هستند.

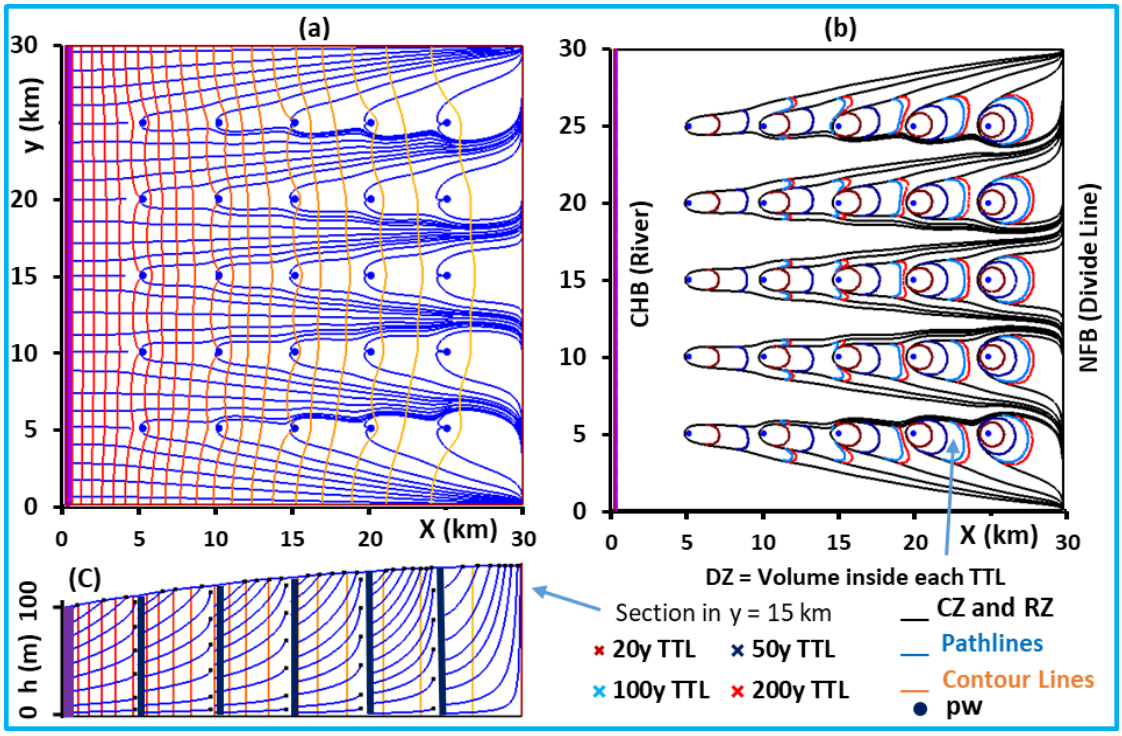
Fig. 13. (a): Capture zone and discharge zone for well location (position) in the direction of flow from the discharge boundary to the division boundary. (b): wells location in y = 15 km. Travel time lines are for 1 year.

بررسی حریم آبگیر و حریم تخلیه در سیستم چندچاهی در آبخوان آزاد آبرفتی

تاکنون در این مطالعه اثر پارامترهای مختلف چاه و آبخوان بر حریم‌های آبگیر و تخلیه در یک سیستم تک‌چاهی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج رضایت بخشی از جهت توسعه‌ی دیدگاه کارشناسان مدیریت آب‌های زیرزمینی به همراه داشت. اما کارشناسان در عمل با سیستم چندچاهی نامنظمی مواجه هستند که اثر تداخل مخروط‌های افت، باعث

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

تغییر شکل حریم‌های آبگیر و تخلیه‌ای می‌شود که در سیستم‌های تک‌چاهی تعیین شده‌اند. بنابراین تصمیم‌گیری در خصوص حریم حفاظت از چاه‌های آب نیازمند استخراج حریم‌های آبگیر و تخلیه در مواجه با شرایط واقعی آبخوان است. با توجه به شرایط پیچیده‌ی مرزی و تعداد کم پیزومترها در آبخوان استفاده از روش‌های تحلیلی در این موضوع کاری پیچیده و همراه با خطا خواهد بود. بنابراین در شرایط واقعی آبخوان‌ها، گزینه‌ی مناسب و نزدیک‌تر به واقعیت استفاده از مدل‌های عددی در شبیه‌سازی سطح آب و استفاده از مدل‌های ردیاب در شبیه‌سازی مسیر جریان است. در شکل ۱۴ موقعیت حریم‌های آبگیر و تخلیه در چند چاه در یک آبخوان آزاد آبرفتی با سطح آب شیب‌دار نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌شود اثر عوامل مختلف از جمله اثر تداخل و اثر موقعیت چاه‌ها باعث شده است که حریم‌های مذکور به گونه‌ای ظاهر شوند که بسیار متفاوت از سیستم تک‌چاهی است. این وضعیت مؤید این است که در تعیین مناطق حفاظت از کمیت و کیفیت چاه‌های آب که به نوعی در ارتباط با حریم‌های آبگیر، تخلیه، تأثیر و تغذیه هستند، می‌بایست تا حد ممکن شرایط پیچیده‌ی آبخوان را در نظر گرفته و مدل مناسبی از آبخوان را در سیستم چندچاهی مورد مطالعه قرار داد.



شکل ۱۴. حریم آبگیر و حریم تخلیه و حریم تغذیه در یک آبخوان آزاد آبرفتی با سطح آب اولیه شیب‌دار در یک سیستم چندچاهی (حریم تأثیر هر چاه بخش عمده‌ای از کل آبخوان است)

Fig. 14. Capture Zone and discharge zone and Recharge zone in an alluvial unconfined aquifer with a sloping initial water table in a multi-well system (influence zone of each well is a major part of the entire aquifer).

بررسی اثر نسبت تخلیه به تغذیه بر حریم‌های مرتبط با حفاظت از چاه‌های آب در آبخوان آزاد آبرفتی

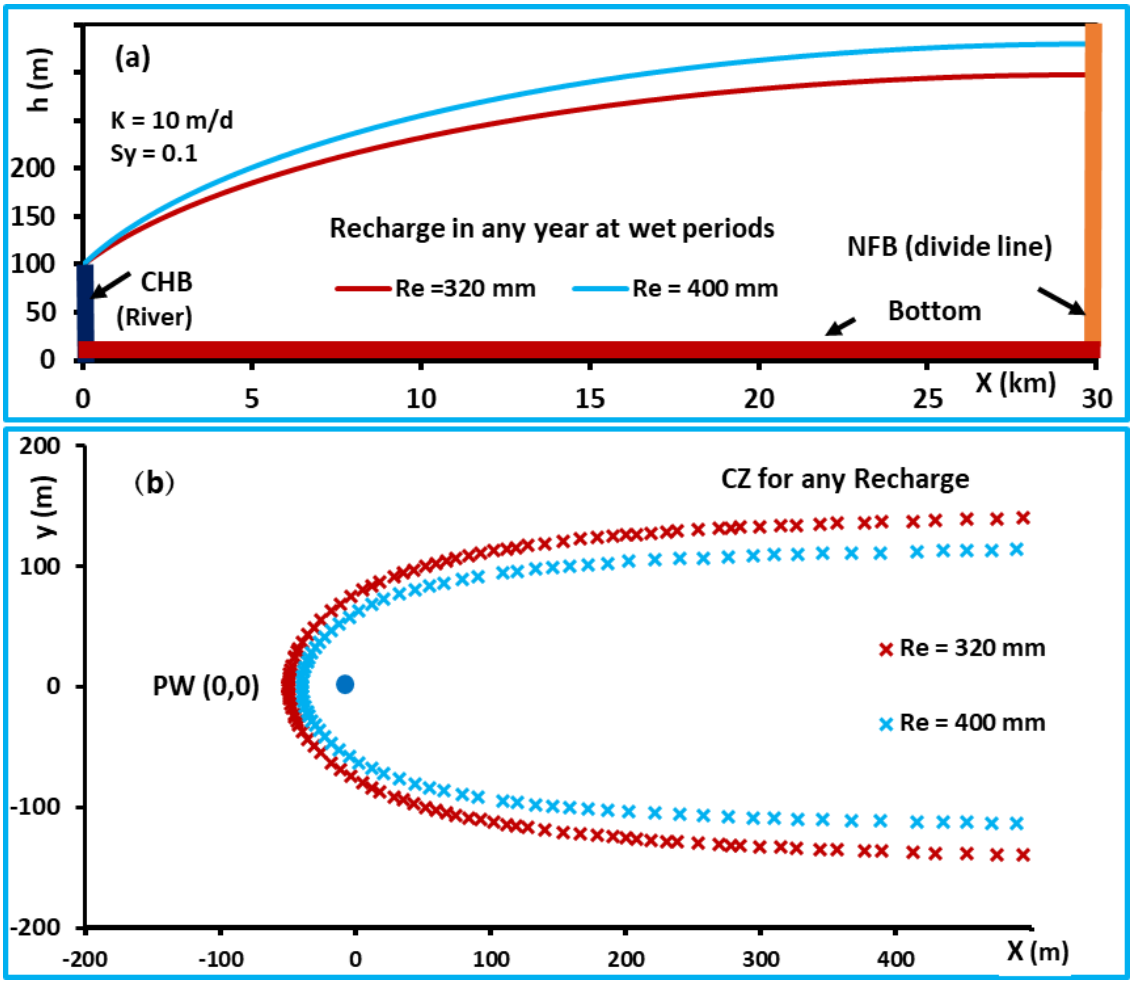
بر اساس آنچه در شکل‌های ۲ و ۱۰ نشان داده شد، سطح آب طبیعی آبخوان متناسب با مقدار تغذیه‌ی متوسط آبخوان در یک موقعیت خاص به تعادل رسیده و در این موقعیت در دوره‌های تر و خشک به مقدار کمی نوسان می‌کند و در این شرایط بیلان طبیعی آب برقرار و خروجی طبیعی آبخوان معادل ورودی تغذیه است. اما با حفر چاه‌ها و برداشت از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

آن‌ها بیلان طبیعی آبخوان به هم خورده و سطح تراز آب افت خواهد کرد. مقدار افت سطح تراز آب در آبخوان علاوه بر مقدار تغذیه، متأثر از مقدار تخلیه از طریق چاه‌ها است. اگر مقدار برداشت از طریق چاه در یک نسبت مشخص از تغذیه ثابت بماند، در این صورت سطح آب آبخوان، نسبت به حالت نرمال به تراز پایین‌تری تنزل یافته و در این تراز جدید بیلان آب در آبخوان برقرار می‌شود. در این سطح تراز، حریم‌های مرتبط با حفاظت از چاه از قبیل حریم آبگیر و تخلیه و غیره تثبیت شده و می‌توان بر اساس آن‌ها حریم حفاظت را برآورد کرد. اگر تعداد یا مقدار برداشت چاه‌ها همچنان در حال افزایش باشد، در این صورت سطح آب آبخوان همچنان رو به کاهش بوده و حریم‌های مربوطه در حال گسترش خواهند بود. بنابراین برای تعیین یک حریم حفاظت مطمئن، ابتدا باید تصمیم گرفت که نهایتاً تا چه مقدار از تغذیه برای برداشت از طریق چاه‌ها مجاز بوده و از این طریق سطح تراز آب مبنا را مشخص کرد. پس از مشخص کردن سطح تراز مبنا استخراج حریم‌های مرتبط با حفاظت از چاه با استفاده از شبیه‌سازی به سهولت میسر است. این‌که کاهش سطح آب نسبت به حالت نرمال تا چه حد مجاز باشد، هم به مقدار افت مجاز از جهت پدیده فرونشست مرتبط است و هم به مقدار حقابه‌ی محیط‌زیست و نیازمند مطالعات جداگانه است. همچنان‌که در شکل 15a دیده می‌شود اگر در یک آبخوان آبرفتی آزاد در دوره‌ی‌ترِ سال، ۴۰۰ میلی‌متر تغذیه وجود داشته باشد، سطح آب نرمالی در آبخوان ایجاد خواهد کرد که در بالادست حدود ۳۲ متر بالاتر از سطح تراز نرمالی است که برای ۳۲۰ میلی‌متر تغذیه در سال ایجاد خواهد شد. در آبخوان شکل۱ با وسعت ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر به ازای ۴۰۰ میلی‌متر تغذیه، مقدار ۳۶۰ میلیون متر مکعب آب به‌صورت تغذیه سطحی وارد آبخوان می‌شود. این مقدار آب در حالت طبیعی به‌صورت جریان زیرزمینی و با توجه به گرادیان هیدرولیکی، به‌تدریج و در طول سال به داخل رودخانه تراوش می‌کند و بیلان در حالت طبیعی برقرار است و سطح تراز آب در این حالت فقط مقدار کمی در دوره‌های تر و خشک نوسان می‌کند. اگر از این آبخوان فقط معادل ۸۰ میلی‌متر از تغذیه برای برداشت از طریق چاه اختصاص داده شود، حجم آبدهی چاه‌ها در سال معادل ۷۲ میلیون متر مکعب خواهد شد و اگر چاه‌ها به‌طور مناسب در کل آبخوان آبرفتی جانمایی شده باشند، سطح تراز نرمال آب در آبخوان بعد از چندین سال به تراز پایین‌تری تنزل یافته و تقریباً معادل سطح تراز نرمال آبخوان برای تغذیه‌ی ۳۲۰ میلی‌متری است. در این تراز جدید بیلان آب معادل ۳۶۰ میلیون متر مکعب تغذیه و ۷۲ میلیون متر مکعب تخلیه از طریق چاه و ۲۸۸ میلیون متر مکعب تخلیه از طریق رودخانه است. همچنان‌که در شکل 15b مشاهده می‌شود، حریم آبگیرِ چاهی که در مرکز آبخوان قرار داشته است در سطح ترازی که معادل ۳۲۰ میلی‌متر تغذیه بدون تخلیه از طریق چاه‌های دیگر یا معادل ۴۰۰ میلی‌متر تغذیه همراه با ۸۰ میلی‌متر تخلیه از طریق چاه‌های پراکنده در آبخوان است، وسیع‌تر از حریم آبگیری است که در سطح ترازی استخراج شده است که معادل ۴۰۰ میلی‌متر تغذیه بدون تخلیه از طریق چاه‌های دیگر در آبخوان است. با توجه به شکل‌های ۲ و۱۰ می‌توان متوجه شد که هرچه نسبت تخلیه از طریق چاه‌ها به تغذیه در آبخوان بیشتر شود حریم آبگیر چاه‌ها تا مدت‌های طولانی تثبیت نشده و همواره با عدم قطعیت مواجه بوده و به طور مداوم در حال گسترش است، تا اینکه سطح آب در آبخوان در سطح تراز جدید و پایین‌تری تثبیت شود. لازم به ذکر است که اگر مقدار تخلیه از طریق چاه‌ها به مقدار تغذیه نزدیک شود به تدریج سطح تراز آب در کل آبخوان به حالت افقی رسیده و حریم آبگیر در تمام جهات گسترش می‌یابد. در این حالت عملاً تخلیه‌ی طبیعی به رودخانه‌ها متوقف و حقابه‌ی محیط‌زیست از بین رفته و از طرفی پدیده‌ی فرونشست به شدت تشدید می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]



شکل ۱۵. اثر نسبت تخلیه به تغذیه بر حریم آبگیر در چاه مرکزی آبخوان. شکل تغییر حریم آبگیر چاهی در مرکز یک آبخوان را نشان می‌دهد که سطح تراز آن از طریق چاه‌هایی که به طور مناسب در کل آبخوان جانمایی شده‌اند تنزل یافته است. مقدار تخلیه‌ی کل چاه‌ها معادل ۸۰ میلی‌متر از کل تغذیه‌ی آبخوان بوده است.

Fig. 15. The effect of the ratio of discharge to recharge on the capture zone in the central well of aquifer. It shows the change of the capture zone of the well in the center of an aquifer whose level has been lowered by means of wells properly installed throughout the aquifer. The discharge of all the wells was equal to 80 mm of the total recharge of the aquifer.

نتیجه‌گیری

در تعیین حریم حفاظت از چاه‌های آب، تحلیل حریم‌های تأثیر، آبگیر، تغذیه و تخلیه امری ضروری است و علی‌رغم پژوهش‌های متعددی که در این زمینه انجام شده، هنوز جای بحث و بررسی بیشتر دارد. هدف از این پژوهش تحلیل حریم‌های آبگیر و تخلیه در یک آبخوان آزاد آبرفتی است. این آبخوان در سمت بالادست به یک مرز خط تقسیم آب و در سمت پایین دست به یک مرز آبی ختم شده است. برای نمایش بهتر نتایج، بار هیدرولیکی در مرز آبی ثابت فرض شد تا خطوط جریان بر آن عمود گردد. قطعه‌ای از این آبخوان که میان دو خط جریان قرار دارد مدل مفهومی مناسبی برای شبیه‌سازی است. برای شبیه‌سازی از مدل‌های مادفلو و مادپس استفاده شد. آبخوان مورد نظر با وسعت ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر و در پایین دست با عمق ۱۰۰ متر، با شبکه‌بندی منظم در یک لایه برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد (به کوچکی قطر چاه در موقعیت چاه‌ها و افزایش تدریجی تا ۱۰۰ متر). گام‌های زمانی از ۰.۰۰۰۰۰۱ روز تا

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

۲۰۵ روز در طول دوره خشک به تدریج افزایش یافته و سپس با تکرار دوره‌های تر ۱۶۰ روزه و خشک ۲۰۵ روزه شبیه‌سازی برای ۲۰۰ سال صورت گرفت. صحت خروجی‌های مدل عددی با مدل‌های تحلیلی تائید شد و سپس اثر پارامترهای مستقل چاه و آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی هر پارامتر مشخصات پایه ثابت و فقط پارامتر هدف تا ۱۰ مرتبه تغییر داده شد.

تغییر در هدایت هیدرولیکی، تخلخل، آبدهی ویژه، شیب سنگ بستر، ضخامت اولیه و ناهمگنی هیچ‌گونه تغییری در مساحت حریم آبگیر ایجاد نکرد اما تغییر در تغذیه سطحی، تخلیه چاه و موقعیت چاه، باعث ایجاد تغییرات زیاد در مساحت حریم آبگیر شد. با تغییر در همه‌ی پارامترهای مذکور حریم تخلیه تغییر کرد. علت عدم تغییر مساحت حریم آبگیر در تغییر برخی از پارامترها این است که در آبخوان‌های آزاد، ضخامت آبخوان و شیب هیدرولیکی پارامترهای مستقلی نبوده و تابع دیگر پارامترها می‌باشند، این به آن معنی است که علی‌رغم ایجاد تغییر در برخی پارامترها، همواره حاصل‌ضرب KbI مقداری ثابت است. چون مساحت حریم آبگیر تابع این حاصل‌ضرب است، لذا با وجود تغییر در این پارامترها، وسعت حریم آبگیر تغییر نمی‌کند.

در سیستم تک‌چاهی در زمان‌های اولیه به تدریج بر وسعت حریم آبگیر افزوده شد، ولی از یک روز به بعد، با افزایش زمان پمپاژ و علی‌رغم تداوم گسترش مخروط افت، هیچ تغییری در حریم آبگیر ایجاد نشد. در برداشت‌های کم از آبخوان سطح آب نسبتاً پایدار اولیه پس از مدت کوتاهی در نزدیکی چاه به یک سطح آب نسبتاً پایدار در تراز پایین‌تر می‌رسد، بنابراین پس از مدت کوتاهی وسعت حریم آبگیر به حداکثر مقدار خود رسیده و ثابت باقی می‌ماند. اما در سیستم‌های چندچاهی با برداشت زیاد از آبخوان، سطح آب نسبتاً پایدار اولیه، کاهش چشمگیری داشته و برای رسیدن به سطح آب نسبتاً پایدار در تراز پایین‌تر، زمان طولانی‌تری لازم است، لذا تا آن زمان حریم آبگیر همچنان توسعه می‌یابد. با ایجاد سیستم چندچاهی نشان داده شد که چگونه اثر تداخل مخروط افت در سیستم‌های چندچاهی، باعث ایجاد تغییر در حریم‌های آبگیر و تخلیه می‌شود.

مشخص شد که هر گونه افزایش تخلیه یا کاهش تغذیه، باعث کاهش سطح تراز طبیعی آب و افزایش شدید وسعت حریم‌های آبگیر و تخلیه و نهایتاً افزایش حریم‌های حفاظت از چاه‌های آب می‌شود. این نشان می‌دهد که حدود تعیین شده برای این مناطق همواره با عدم قطعیت بالایی برخوردار است و این عدم قطعیت عمدتاً بیشتر از عدم قطعیت ناشی از عدم اطمینان در مشخصات آبخوان است. درجه‌ی قطعیت مناطق مذکور عمدتاً به حفظ تعادل بین تغذیه و تخلیه و به پایداری نسبی سطح آب استاتیک دینامیک ثانویه‌ای بستگی دارد که پس از حفاری و فعالیت چاه‌ها در آبخوان ایجاد می‌گردد. تصمیم‌گیری در مورد تثبیت موقعیت سطح تراز ثانویه‌ی آب، نیازمند مطالعه‌ی دقیق پدیده‌ی فرونشست و تعیین نسبت بهینه‌ی تخلیه از طریق چاه به تغذیه در آبخوان است.

منابع

Ayinippully Nalarajan, N., Govindarajan, S., Nambi, I. 2022. Aquifer heterogeneity on well capture zone and solute transport: numerical investigations with spatial moment analysis. International Journal of Environmental Science and Technology, 19(8), 7261-7274. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03573-y

Barlow, P. M., Leake, S. A., Fienen, M. N. 2018. Capture Versus Capture Zones: Clarifying Terminology Related to Sources of Water to Wells. Groundwater, 56(5), 694-704. https://doi.org/http://doi.org/10.1111/gwat.12661

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

Barrash, W., Dougherty, M. E. 1997. Modeling axially symmetric and nonsymmetric flow to a well with MODFLOW, and application to Goddard2 well test, Boise, Idaho. Groundwater, 35(4), 602-611. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00125.x

Bear, J., Jacobs, M. 1965. On the movement of water bodies injected into aquifers. Journal of Hydrology, 3(1), 37-57.

Dupuit, J. E. 1863. Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. Dunod, Paris, 352 pp.

Goodarzi, M., Eslamian, S. S. 2019. Evaluation of WhAEM and MODFLOW models to determine the protection zone of drinking wells. Environmental Earth Sciences, 78(6), 195. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8204-5

Grubb, S. 1993. Analytical model for estimation of steady-state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers. Groundwater, 31(1), 27-32. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00824.x

IGNSL .2014. Capture-Zone-Delineation-Technical-Report (Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited, Issue GNS Science Report 2013/57). www.gns.cri.nz

Javandel, I., Tsang, C. F. 1986. Capture-zone type curves: A tool for aquifer cleanup. Groundwater, 24(5), 616-625.

Khalilabad, N. M., Mohtashami, A., Akbarpour, A. 2022. Application of random walk algorithm into finite element numerical groundwater model for capture zone depiction. Sustainable Water Resources Management, 8(2), 1-10. https://doi.org/10.1007/s40899-022-00618-z

Langevin, C. D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Niswonger, R.G., Panday, Sorab, Provost, A.M. 2017. Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A55, 197 p. https://doi.org/10.3133/tm6A55

Liu, Y., Weisbrod, N., Yakirevich, A. 2019. Comparative Study of Methods for Delineating the Wellhead Protection Area in an Unconfined Coastal Aquifer. Water, 11(6), 1168. https://doi.org/doi:10.3390/w11061168

Mahdavi, A. 2019. Transient-state analytical solution for arbitrarily-located multiwells in triangular-shaped unconfined aquifer. Water resources management, 33(10), 3615-3631. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02324-6

McDonald, M. G., Harbaugh, A. W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model (Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey Issue book 6, chap. A1). https://doi.org/10.3133/twri06A1

McElwee, C. D. 1991. Capture zones for simple aquifers. Groundwater, 29(4), 587-590. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1991.tb00551.x

Moench, A. F. 1997. Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water table aquifer. Water Resources Research, 33(6), 1397-1407. https://doi.org/10.1029/97WR00651

Muskat, M. 1934. The flow of compressible fluids through porous media and some problems in heat conduction. *Physics*, *5*(3), 71-94. https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.1745233

Nagheli, S., Samani, N., Barry, D. A. 2020. Capture zone models of a multi-well system in aquifers bounded with regular and irregular inflow boundaries. Journal of Hydrology X, 7, 100053. https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100053

Neuman, S. P. 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. Water Resources Research, 8(4), 1031-1045. https://doi.org/10.1029/WR008i004p01031

Neuman, S. P. 1974. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. Water Resources Research, 10(2), 303-312. https://doi.org/10.1029/WR010i002p00303

Pollock, D. 2016. User Guide for MODPATH Verison 7–a Particle Tracking Model for MODFLOW. Open-file Report 2016–1086. US Geol Surv Washington, DC MODPATH, 7. https://doi.org/10.3133/ofr20161086

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

Pollock, D. W. 1988. Semianalytical computation of path lines for finite-difference models. Groundwater, 26(6), 743-750. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00425.x

Rodriguez-Pretelin, A., Nowak, W., Morales-Casique, E. 2022. Optimization-based clustering of random fields for computationally efficient and goal-oriented uncertainty quantification: Concept and demonstration for delineation of wellhead protection areas in transient aquifers. Advances in Water Resources, 162, 104146. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104146

Samani, N., and Zarei-Doudeji, S. 2015. A General Analytical Capture Zone model: A Tool for Groundwater Remediation. *IFAC-PapersOnLine*, *48*(1), 234-239. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.065

Shafer, J. M. 1987. Reverse pathline calculation of time-related capture zones in nonuniform flow. Groundwater, 25(3), 283-289. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1987.tb02132.x

Shan, C. 1999. An analytical solution for the capture zone of two arbitrarily located wells. Journal of Hydrology, 222(1-4), 123-128. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00101-8

Theis, C. V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Eos, Transactions American Geophysical Union, 16(2), 519-524. https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519

Thiem, G. 1906. Hydrologische Methoden: Leipzig, Germany. JM Gebhardt, 56p.

UKEA .2019. Manual for the production of Groundwater Source Protection Zones (U.K.Environment Agency, Issue Report March 2019). www.gov.uk/environment-agency

USEPA .2008. Systematic approach for evaluation of capture zones at pump and treat systems (U.S. Environmental Protection Agency, Issue Report EPA/600/R-08/003). http://www.epa.gov/ada/

USGS .1991. Description and evaluation of selected methods used to delineate wellhead-protection areas around public-supply wells near Mt. Hope, Kansas (U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Issue Report 90-4102). https://books.google.com/books?id=WlGITJCoakUC

Yang, Y. J., Spencer, R. D., Gates, T. M. 1995. Analytical solutions for determination of non-steady-state and steady-state capture zones. Groundwater Monitoring & Remediation, 15(1), 101-106. https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1995.tb00507.x

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

The effects of aquifer and well parameters on Capture Zone and Discharge Zone in alluvial unconfined aquifers

Amin Ahmadi [1*], Manouchehr Chitsazan [2], Seyed Yahya Mirzaee [3], Arash Nadri [4]

1. PhD Student, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2. Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3. Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
4. PhD, Arizona Department of Water Resources, Phoenix, USA

Received: 10 May 2022 Accepted: 06 Jul 2022

Abstract

In order to protect water wells, it is necessary to analyze the zones of influence, capture, recharge and discharge zones. Despite much research, this issue still needs further discussion. The purpose of this research is to analyze the capture and discharge zones of water wells in alluvial unconfined aquifers. For this purpose, a hypothetical aquifer was simulated using the Modflow and Modpath models. The accuracy of the numerical model outputs was confirmed by comparison with the analytical calculations, and then the effect of the independent parameters of the well and the aquifer was investigated. This research showed that, contrary to popular belief, changes in hydraulic conductivity, specific yield, bedrock dip, initial thickness, porosity, and heterogeneity do not cause changes in the surface extent of the well's capture zone in the unconfined aquifer.This research has shown that changes in surface recharge, discharge and well location cause many changes in the surface extent of the well capture zone in unconfined alluvial aquifers. Investigation of the effect of pumping time in a single well system showed that the size of the capture zone initially increases, but after a short period, of time, despite the continued expansion of the drawdown cone, its position stabilises. It was found that the change in all the above parameters causes a change in the size of the well's discharge zone. The stability of the above-mentioned areas is very important for the determination of zones for the protection of the quantity and quality of water wells! It has been found that the relative stability of the water level in the aquifer at an appropriate level is necessary, and this requires the management of the aquifer and the allocation of a limited percentage of the aquifer recharge to discharge through wells.

Keywords: Anisotropy, Slate, Brazilian test, Fracture pattern, Tensile strength

*Corresponding author: aminahmadi349@gmail.com

DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.2.1019241

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

Introduction

Many analytical studies have been carried out to study the capture zone of water wells, and for this purpose relationships have been extracted that are mostly used in the case of single well systems (Muskat, 1934, 1937; Bear and Jacob 1965; Javandel and Tsang, 1986; Shafer, 1987; McElwee, 1991; Grubb, 1993; Yang et al., 1995; Yang et al., 1995; Shan, 1999). In recent years, several semi-analytical methods have been proposed to estimate the capture zone in single-well and multi-well systems, despite different boundary conditions, and numerous computer codes have been provided in this field (Mahdavi, 2019; Nagheli et al., 2020). The above mentioned analytical and semi-analytical methods mainly represent the well capture zone in steady flow and homogeneous aquifers, and they require coding and iterative solution methods to draw the capture zone. Since the groundwater system in alluvial unconfined aquifers is transient and faces many boundary conditions, the use of solution methods based on numerical models is necessary and unavoidable (McDonald and Harbaugh, 1988; Langevin, 2017; Pollock, 1989; Pollock, 2016; Rodriguez-Pretelin et al., 2022; Khalilabad, 2022; Ayinippully Nalarajan, 2021 ; Liu, 2019; Goodarzi, 2019). The purpose of this research is to study the effect of independent parameters of the well and the aquifer on the capture zone (CZ), discharge zone (DZ) and finally the protection zone of water wells in alluvial unconfined aquifers; because the issue has not been comprehensively addressed from this point of view, and it still needs more research.

Materials and Methods

The aquifer considered in this study is an unconfined alluvial aquifer located between a dividing line and a river, and a well is designed in its center (Fig. 1a). The Modflow model was used to simulate the flow, and the grid at the location of the wells was made in the form shown in Fig.1b. In order to obtain the normal water level of the aquifer for each amount of recharge, the aquifer was simulated with appropriate stress periods for a long time. To simulate the tracking of the particles, the Modpath model was used to extract the capture zone and the discharge zone. To ensure the correct performance of the numerical model, its outputs were compared with analytical equations. To study the effect of each well and aquifer parameter, the value of that parameter was changed up to 10 times.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

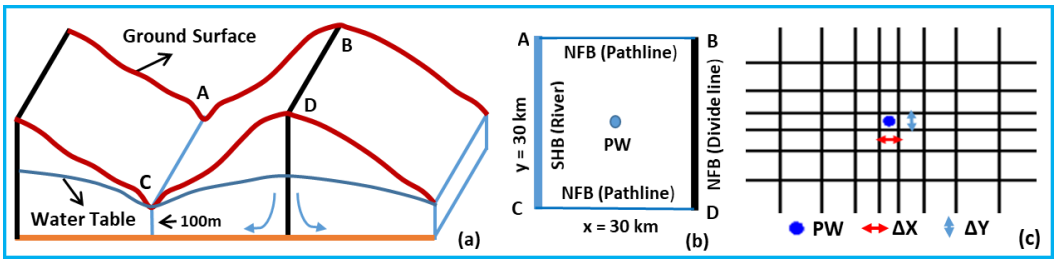


Fig.1. Schematic design of the hypothetical aquifer under study and the boundary conditions applied to the Modflow

Results and Discussion

In order to study the effects of wells and aquifers on the capture zone and discharge zone in the unconfined alluvial aquifer, the normal water level was extracted for each value of each parameter. To extract the normal water level of the aquifer for each value of its parameters, the simulation of the flow without the presence of the well has been continued until the water level in the aquifer has reached equilibrium and the amount of rise and fall in the wet and dry periods is equal. Then, the water level at the end of the wet period is stored and used as the initial water level in the simulation of the well. After extracting the normal water level, the changes in water level (H), saturation thickness (b), hydraulic gradient (I), transmissivity (T), etc. are first described, and then the well is simulated in the aquifer for 100 years. Finally, after simulating the well, the changes in the capture zone and discharge zone are explained.

The well simulation was done by keeping the basic characteristics in the aquifer constant and gradually changing K and using the corresponding normal water level in each K. After simulating the flow with the Modflow model by selecting the appropriate number of particles in the well and in the aquifer blocks upstream of the well and then running the Modpath model, the location of the capture zone was determined. By running the backward form on the particles in the well for a period of time, the travel time line for that period was drawn around the well, with the volume inside representing the discharge zone. A significant point in the analysis of the effects of K in alluvial unconfined aquifers is that the area of CZ remains constant with the change of K. To justify such a situation, it can be said that in the unconfined aquifer, b and I are not independent and depend on K. Therefore, it seems that despite the change of K, the product value of these three parameters is always the same value. In the case of DZ, its surface area has increased with increasing K. The reason for this situation is the decrease of b at large values of K (Fig 2). By examining the effect of other parameters such as specific yield, bedrock dip, initial thickness at the drainage boundary, and heterogeneity, it was found that their effect on the capture zone is similar to the effect of hydraulic conductivity and that changing them does not

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]

change the capture zone. By examining the effect of other parameters such as surface recharge, well discharge, and well position relative to the drainage boundary, it was found that their effect on the capture zone is opposite to the effect of hydraulic conductivity, and their change causes a change in the capture zone (Fig3).

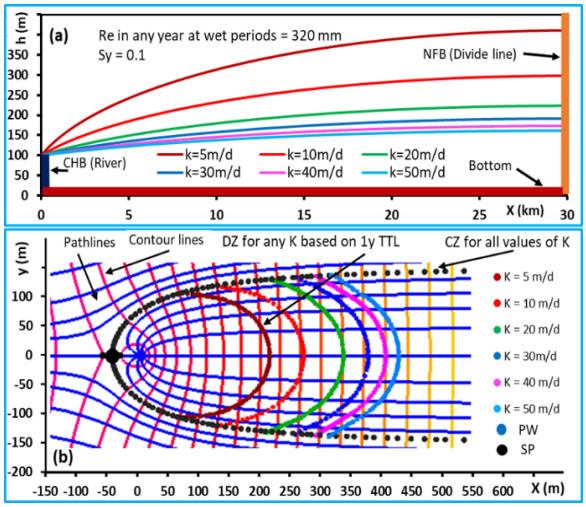


Fig.2. The effect of K on CZ and DZ.

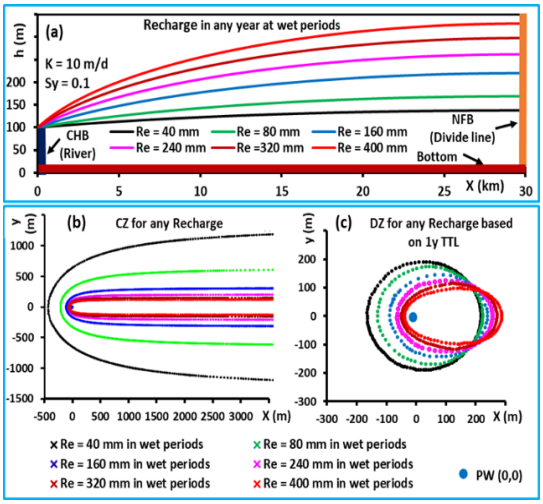


Fig. 3. The effect of Re on CZ and DZ.

Conclusions

Despite the numerous researches that have been done on the capture zone, this issue is still a matter of discussion. The purpose of this research is to analyze the capture zone and discharge zone in an unconfined alluvial aquifer. Modflow and Modpath models were used for simulation and the effect of independent well and aquifer parameters was investigated. The results showed that the change of hydraulic conductivity, porosity, specific yield, bedrock dip, initial thickness and heterogeneity did not cause any change in the area of the capture zone, but the change of surface recharge, well discharge and well position caused large changes in the area of the capture zone. On the other hand, with the change of all the mentioned parameters, the discharge zone changed. It was found that any increase in discharge or decrease in recharge causes a drawdown in the natural water level and a sharp increase in the size of the capture and discharge zones. This shows that the areas defined for these zones always have a high degree of uncertainty and that the degree of certainty of these areas depends mainly on maintaining the balance between recharge and discharge and on the relative stability of the water level created in the aquifer.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019241]