Archive of SID

فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۱۵، شماره ۵۷، بهار ۱۴۰۰، صفحات ۱۵-۲۷

تخمین تغذیه به آبخوان مرزی سرخس با استفاده از مدل عددی

نرگس نبی‌زاده چمازکتی[۱] و هادی جعفری[۲و*]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲. دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۱۸

چکیده

تخمین تغذیه از مباحث مهم در مطالعات منابع آب زیرزمینی به‌خصوص بیلان آبخوان‌ها است و در راستای مدیریت بهره‌برداری از آنها سودمند می‌باشد. در این تحقیق تغذیه به آبخوان آبرفتی سرخس که تنها منبع تأمین‌کننده‌ی آب برای مصرف‌های مختلف شرب، کشاورزی و صنعت در دشت سرخس (شمال شرق ایران و مجاور مرز ترکمنستان) می‌باشد، با استفاده از مدل MODFLOW در نرم‌افزار FREEWAT برآورد شده است. پس از ساخت مدل مفهومی آبخوان و تبدیل آن به مدل عددی، فرآیند واسنجی مدل در شرایط ناپایدار در یک دوره دو ساله (سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۵-۱۳۹۶) و صحت‌سنجی آن انجام شده است. بررسی حساسیت مدل عددی به پارامتر تغذیه نشان‌دهنده توانایی آن در تخمین تغذیه به آبخوان می‌باشد. بر اساس نتایج مدل عددی میزان تغذیه سطحی سالانه به آبخوان سرخس حدود ۸۰ میلیون مترمکعب است که از دو منبع بارش (حدود ۳۲ میلیون مترمکعب در سال) و آب برگشتی کشاورزی (حدود ۴۸ میلیون مترمکعب در سال) صورت می‌گیرد. بر این اساس ضریب تغذیه ناشی از بارش حدود ۲۰ درصد بارش سالیانه و ضریب جریان برگشتی ناشی از آبیاری برابر ۱۵ درصد تخلیه سالانه چاه‌های بهره‌برداری برآورد شده است. تغییرات زمانی تغذیه به آبخوان بر اساس مدل عددی کالیبره شده نشان‌دهنده رخداد تغذیه ناشی از بارش در ماه‌های دی تا خرداد و جریان برگشتی آبیاری از آبان تا فروردین هر سال می‌باشد. ضرایب تغذیه در محاسبات بیلان و در راستای مدیریت بهینه آبخوان سرخس و آبخوان‌های مشابه در ایران قابل استفاده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب برگشتی آبیاری، بیلان، تغذیه بارش، خراسان رضوی، MODFLOW.

مقدمه

تغذیه آب‌های زیرزمینی[۱] که با اصطلاحات مختلف نظیر نفوذ خالص[۲]، زهکشی[۳] یا نفوذ عمقی[۴] توصیف می‌شود، معرف حرکت یا جابجایی آب در زیر منطقه ریشه است که به دو گروه پراکنده[۵] و متمرکز[۶] قابل تقسیم می‌باشد (Scanlon et al., 2002). تغذیه پراکنده معرف تغذیه ناشی از بارش یا آبیاری است که به‌صورت یکنواخت از یک سطح بزرگ روی می‌دهد، درحالی‌که تغذیه متمرکز در برگیرنده تغذیه ناشی از گودی‌های توپوگرافی نظیر رودخانه و دریاچه می‌باشد.

تخمین تغذیه یکی از مهم‌ترین مباحث در مطالعات آب زیرزمینی به‌خصوص در مطالعات بیلان آب زیرزمینی می‌باشد.

* نویسنده مرتبط: h_jafari@shahroodut.ac.ir

1. Groundwater recharge
2. Net infiltration
3. Drainage
4. Percolation
5. Diffuse
6. Focused

www.SID.ir

Archive of SID

مدیریت وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی در گام اول مستلزم شناخت کافی از سیستم آبخوان می‌باشد. در این راستا تخمین تغذیه به‌عنوان آب ورودی به سیستم آب زیرزمینی ضروری می‌باشد. شناخت و یافتن درک صحیح از تغذیه منابع آب زیرزمینی در مدیریت موفق منابع آب و همچنین مدل‌سازی سیال و انتقال آلودگی در ناحیه زیرسطحی و بررسی آسیب پذیری لایه آبدار مورد نیاز می‌باشد (Healy، 2010).

تکنیک‌های تخمین تغذیه بر اساس مناطق هیدرولوژیکی که اطلاعات مورد نیاز از آن‌ها به دست می‌آید، به سه گروه تکنیک‌های آب سطحی، منطقه غیراشباع و منطقه اشباع تقسیم می‌شوند. روش‌های تخمین تغذیه در هر منطقه به انواع تکنیک‌های فیزیکی، ردیابی و مدل‌سازی عددی طبقه‌بندی می‌شوند. روش مدل‌سازی عددی[1] از جمله تکنیک‌های تخمین تغذیه است که در هر سه منطقه آب‌های سطحی، غیراشباع و اشباع قابل کاربرد می‌باشد. در این روش میزان تغذیه طی فرآیندهای توسعه و واسنجی مدل تخمین زده می‌شود. با توجه به این قابلیت، مدل‌های کامپیوتری آب زیرزمینی به‌عنوان مفیدترین ابزار موجود در مدیریت منابع آب زیرزمینی معرفی شده‌اند (Healy، 2010).

Rushton (1997) تغذیه را به دو گروه واقعی[2] و پتانسیل[3] تقسیم‌بندی کرده است. تغذیه پتانسیل که از مطالعات منطقه غیراشباع یا آب‌های سطحی به دست می‌آید، نشان‌دهنده آب عبوری از منطقه ریشه است که ممکن است به سطح ایستابی برسد یا نرسد. درحالی‌که تغذیه واقعی (برآورد شده از مطالعات منطقه اشباع) نشان‌دهنده آبی است که به سطح ایستابی رسیده است.

مدل‌های شبیه‌سازی در تمامی انواع مطالعات هیدروژیکی به‌طور گسترده مورد استفاده هستند و از بسیاری از آن‌ها می‌توان برای برآورد تغذیه بهره‌مند شد. مدل‌ها قادرند تا دید مناسبی را نسبت به عملکرد سیستم‌های هیدرولوژیکی به‌منظور شناسایی عوامل اثرگذار بر تغذیه فراهم کنند. از قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها می‌توان برای ارزیابی چگونگی تغییرات ایجاد شده در اقلیم، کاربرد آب، کاربری اراضی و سایر عوامل موثر بر نرخ تغذیه، استفاده کرد (Healy، 2010). Stoertz and Bradbury (1989) روشی را شرح دادند که در آن از مدل جریان آب زیرزمینی برای محاسبه تغذیه آب زیرزمینی استفاده شده است. ابتدا نقشه سطح ایستابی به صورت دستی رسم و سپس بر روی آن یک شبکه دو بعدی افقی قرار داده شد. ارتفاع سطح ایستابی در نزدیک محل هر گره، به همان گره اختصاص داده شد. سپس از MODFLOW به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده شد. بر اساس نتایج، نرخ تغذیه محاسبه شده با هدایت هیدرولیکی، رابطه خطی نشان داده است. Baver and Mastin (1997) از مدل به‌منظور شبیه‌سازی جزئیات بیلان آبی سه حوضه کوچک در زمین‌های پوشیده از خاک‌های یخچالی در واشنگتن استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل از مدل، مقدار متوسط تغذیه سالانه یخرفت‌ها حدود ۳۷ تا ۱۷۲ میلی‌متر برآورد شد. Tideman et al., (1997) مطالعه مدل‌سازی حوضه آب زیرزمینی منطقه دریاچه میرور انگلستان را به‌منظور توسعه درکی از گستره سه بعدی حوضه و تعیین مؤلفه‌های بیلان آبی نظیر تغذیه انجام دادند. نتایج نشان داد حوضه آب زیرزمینی دریاچه میرور، بسیار بزرگ‌تر از حوضه آب سطحی است و چنانچه مدل آب زیرزمینی بر اساس مرزهای حوضه آب سطحی ساخته شود، در آن صورت مقدار تغذیه حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

Baalousha (2005) با استفاده از مدل میزان تغذیه آب زیرزمینی ناشی از بارندگی در نوار غزه در فلسطین را حدود ۴۳ میلیون مترمکعب برآورد کرد. Dripps et al. (2006) نشان دادند که چگونه مدل در ترکیب با یک کد برآورد پارامتر می‌تواند به‌منظور برآورد تغذیه در حوضه کوچکی واقع در ویسکانسین شمالی مورد استفاده قرار گیرد. واسنجی مدل، بر اساس تطبیق جریان پایه شبیه‌سازی شده، با میانگین سالانه جریان پایه تعیین شده از روش جداسازی هیدروگراف رودخانه‌ای در شرایط پایدار انجام شد.

نرخ تغذیه آب زیرزمینی به‌عنوان شرط مرزی تغذیه برای مدل آب زیرزمینی منطقه‌ای در آلمان مورد استفاده قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد تغذیه محاسبه شده، با تنظیم شاخص جریان پایه برای مناطقی

1. Numerical modeling
2. Actual
3. Potential

www.SID.ir

Archive of SID

که رواناب تحت تأثیر شـــیب و ورود کم آب قرار دارد، بهبود می‌یابد. با استفاده از مجموعه تنظیم شده شاخص جریان پایه، متوســـط نرخ تغذیه آب زیرزمینـــی منطقه حدود ۱۷۰ میلی‌متر در سال می‌باشـــد (Herrmann et al., 2009). مدل‌هـــای ترکیبی حوضه آبریز و جریـــان آب زیرزمینی ابزار مفیدی برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی محسوب می‌شوند. روش یکپارچـــه و ترکیبـــی، کل هیدرولوژی یک سیســـتم حوضه آبریز و آبخوان را در نظر می‌گیرد. نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد تغذیه محاســـبه شده، ممکن است نسبت به زمان و مکان متغیر باشـــد (Healy, 2010). استفاده ترکیبی از مشخصات ایزوتوپی اجزای مختلف چرخه آب و مدل بارش-رواناب برای بررســـی توزیع مکانی و زمانی تغذیه توســـط Uribe et al. (2015) انجام شـــده است. بر اساس نتایج، تغذیه متوســـط طولانی مدت حدود ۲۲ میلی‌متر در ســـال برآورد شده که معادل ۱۵ درصد بارش سالانه حوضه می‌باشد. Ebrahimi et al. (2016) بـــرای تعییـــن میزان تغذیه آب زیرزمینی در مناطق خشک از مدل‌سازی معکوس استفاده کردند. بر اساس نتایج، تغذیه آب زیرزمینی از جریان برگشتی آب کشـــاورزی به میزان ۰/۱۵ میلی‌متر بر روز و تغذیه ناشی از بارش حدود ۰/۰۸ میلی‌متر بر روز (معادل ۱۰/۸ درصد کل بارش سالانه) می‌باشد. از دیگر مطالعات در خصوص تخمین تغذیه با اســـتفاده از مدل می‌توان به مطالعات انجام شده در مناطق خشک تونس (Brini and Zammour, 2016)، منطقه نیمه‌خشک برزیل (Coelho et al., 2017) و کشور عمان (Izady et al., 2019) اشاره کرد.

گستره مطالعاتی سرخس به دلیل قرار گرفتن در مناطق خشـــک ایران، فاقد منابع سطحی آب است و آب زیرزمینی تنها منبع تأمین‌کننده‌ی آب شـــرب، کشـــاورزی و صنعت می‌باشد. در آبخوان دشـــت سرخس ۳۷۴ حلقه چاه عمیق جهت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی (بیشتر برای مصارف کشـــاورزی) حفر شده اســـت. بهره‌برداری زیاد از این آبخوان باعث کاهش ذخیره آب زیرزمینی شده که افت ممتد سطح ایستابی با نرخ حدود ۰/۶ متر در سال طی سالیان اخیر را در پی داشته اســـت. نظر به اهمیت منابع آب زیرزمینی در این آبخوان مرزی و لزوم مدیریت آن در راســـتای حفاظت از این منبع طبیعی ارزشمند، تخمین تغذیه به منابع آب زیرزمینی این دشت ضروری می‌باشد. بنابراین هدف از انجام این تحقیق برآورد تغذیه آب زیرزمینی به آبخوان ســـرخس با استفاده از مدل عددی و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

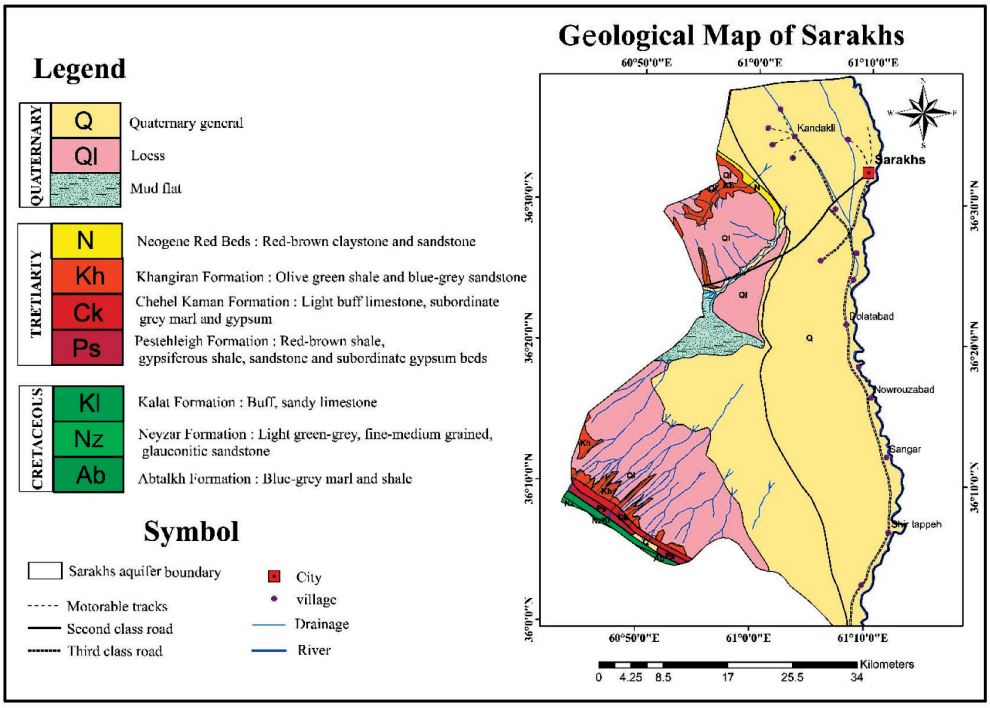
شهر سرخس در ۱۸۰ کیلومتری شهر مشهد در مجاورت مرز ترکمنســـتان قرار دارد. محدوده مطالعاتی سرخس در مختصات جغرافیایی '۴۲ °۶۰ تا '۱۴ °۶۱ طول شـــرقی و '۵۰ °۳۵ تا '۳۷ °۳۶ عرض شـــمالی واقع شـــده است. بر طبق نقشـــه زمین‌شناسی (شـــکل ۱) قدیمی‌ترین سازند در این منطقه ســـازند آب تلخ با سن کرتاســـه است که در بخش جنوب‌غربی محدوده رخنمون دارد. رسوبات کواترنری (Q) گسترش وسیعی در سطح منطقه دارند. به‌طورکلی رسوبات آبرفتی دانه درشـــت می‌باشند و بیشتر از قلوه‌سنگ، ماسه و شن تشـــکیل شـــده‌اند و به‌طرف نواحی غربی و حاشیه ارتفاعات، رسوبات دانه‌ریز سیلتی و رسی خانگیران به آن‌ها اضافه می‌شود (مهندسین مشاور هیدروتک توس، ۱۳۹۳).

آبخوان آبرفتی سرخس از نوع آزاد و دارای شکل به نسبت کشـــیده با امتداد شمالی-جنوبی می‌باشـــد (شکل ۱). مرز شمالی آبخوان منطبق بر مرز ایران-ترکمنستان، مرز شرقی رودخانه هریرود، مرز جنوبی محل تقاطع پل خاتون و رودخانه هریرود و مرز غربی آن حد فاصل کوه و دشت می‌باشد. جنس رســـوبات در محدوده آبخوان از نوع آبرفت عهد حاضر (Q) می‌باشد. ســـازند خانگیران با لیتولوژی شیل و ماسه‌سنگ به‌عنوان سنگ کف آبخوان دشت سرخس شناخته شده است (مهندسین مشاور هیدروتک توس، ۱۳۹۳).

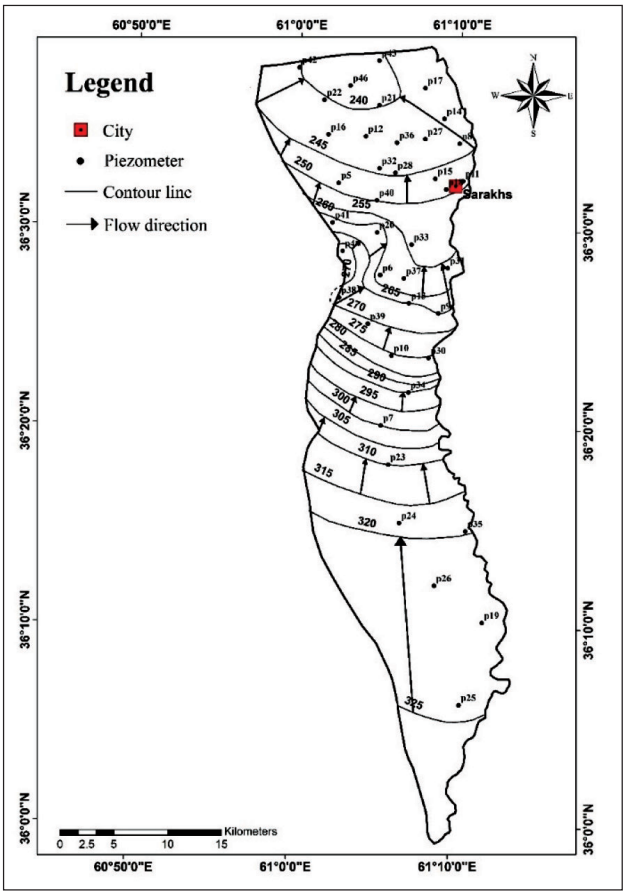
نقشه هم‌پتانسیل سطح ایستابی آبخوان سرخس براساس اطلاعات اندازه‌گیری شـــده عمق سطح آب زیرزمینی در ۴۲ حلقه چاه مشاهده‌ای (پیزومتر) در فروردین سال ۱۳۹۶ رسم شده است (شکل ۲). حداکثر ارتفاع مطلق سطح آب زیرزمینی به میزان ۳۲۴/۲ متر در بخش جنوبی آبخوان و حداقل آن به میزان ۲۳۸/۵ متر در بخش شمالی اندازه‌گیری شده است. بر این اساس جهت کلی جریان آب زیرزمینی از جنوب به سمت شمال می‌باشد. مطابق نقشه هم‌پتانسیل رسم شده مرزهای شـــرقی و غربی آبخوان مرز ورودی زیرزمینی است و به دلیل برداشت محلی و متمرکز آبخوان در بخش شمالی که منجر به تشکیل محدوده بسته در خطوط هم‌پتانسیل شده است، آبخوان فاقد خروجی زیرزمینی می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی سرخس (برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ سرخس، شرکت ملی نفت ایران، ۱۹۸۳)

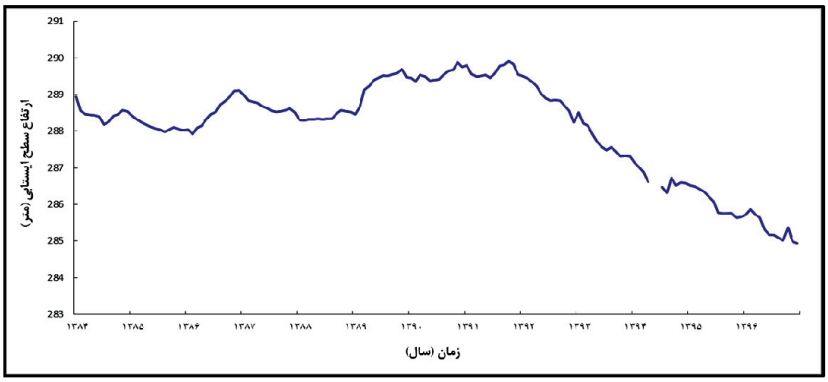


شکل ۲. نقشه هم‌پتانسیل سطح ایستابی آبخوان سرخس (فروردین ۱۳۹۶)

www.SID.ir

Archive of SID

هیدروگراف معرف آبخوان سرخس به منظور بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی رسم شده است (شکل ۳). نوسانات سطح ایستابی آبخوان سرخس تابع میزان تغذیه آبخوان و فعالیت چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد سطح آب زیرزمینی در آبخوان با زمان در حال افت می‌باشد. نرخ افت سطح ایستابی در سال‌های اخیر به دلیل بهره‌برداری بیش از حد از آبخوان و کاهش احتمالی تغذیه منابع آب زیرزمینی ناشی از خشکسالی‌های اخیر و کاهش احتمالی جریان ورودی آب زیرزمینی به آبخوان در اثر احداث سد دوستی در بالادست آبخوان سرخس، افزایش یافته و به حدود ۰/۶ متر در سال آبی ۹۶-۹۵ رسیده است.



شکل ۳. هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی سرخس

روش مطالعه

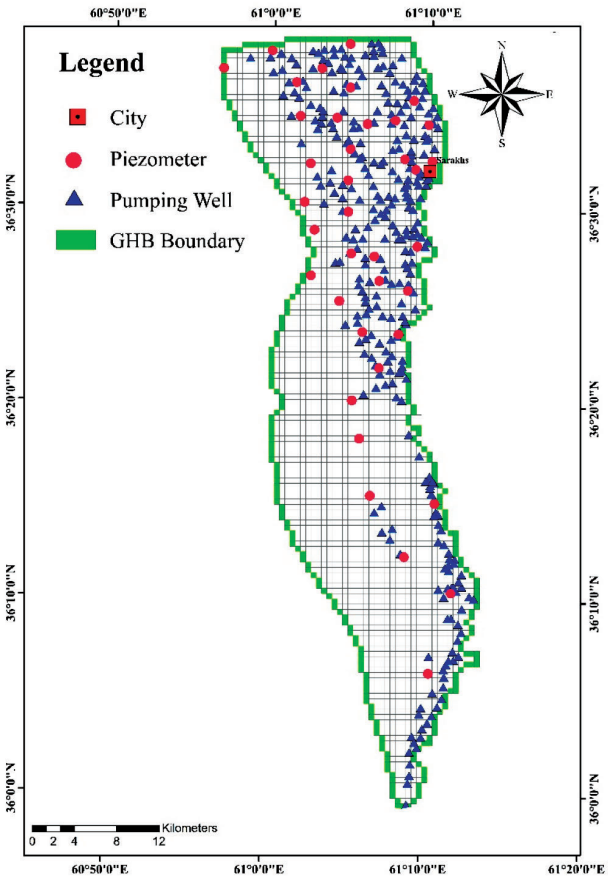
در این تحقیق میزان تغذیه به آبخوان آبرفتی سرخس طی مراحل زیر برآورد شده و تغییرات زمانی و مکانی آن مورد بررسی قرار گرفته است:

الف- توسعه مدل مفهومی آبخوان سرخس: برای ساخت مدل مفهومی در ابتدا اطلاعات و گزارش‌های موجود از آبخوان سرخس که شامل اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای (پیزومتر) و بهره‌برداری، میزان بارش، خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان و نقشه سنگ کف آبخوان می‌باشد، بررسی شد (مهندسین مشاور هیدروتک توس، ۱۳۹۳). با ورود اطلاعات به محیط نرم‌افزار Arc GIS مدل مفهومی آبخوان در دو بخش هندسه و هیدرولیک آبخوان تهیه شد.

ب- ساخت مدل عددی، کالیبراسیون و صحت سنجی آن: مدل مفهومی آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW در نرم‌افزار FREEWAT که نرم‌افزاری برای مدیریت منابع آب زیرزمینی است و امکان شبیه‌سازی کل چرخه هیدرولوژیکی را فراهم می‌کند، به مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی تبدیل شد. گستره آبخوان با توجه به وسعت و شکل هندسی آن و موقعیت مکانی چاه‌ها برای افزایش دقت محاسبات، به سلول‌هایی با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر تقسیم‌بندی شد. جریان آب زیرزمینی از مرزهای ورودی شمالی، جنوبی، شرقی و غربی آبخوان با استفاده از بسته مرز با بار هیدرولیکی عمومی شبیه‌سازی شد. تغذیه سطحی به آبخوان آبرفتی که از دو بخش بارش و آب برگشتی رخ می‌دهد (نبی‌زاده، ۱۳۹۷)، با استفاده از بسته تغذیه شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی چاه‌های بهره‌برداری نیز توسط بسته چاه انجام گرفت (شکل ۴). لازم به ذکر است توزیع مکانی ضرایب هیدرودینامیک آبخوان (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه) نیز به‌عنوان پارامتر مورد نیاز در ساخت مدل عددی در نرم‌افزار وارد شده و در فرایند شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از اجرا، مدل عددی در بازه زمانی شهریور سال ۱۳۹۴ تا شهریور سال ۱۳۹۶ به مدت ۲۴ ماه با دوره‌های تنش یک ماهه (گام‌های زمانی ۳۰ روزه) واسنجی (کالیبره) شد. سپس صحت‌سنجی مدل در یک بازه یک ساله (سال آبی ۹۲-۱۳۹۱) برای ۱۲ دوره تنش انجام شد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴. موقعیت چاه‌های بهره‌برداری، پیزومترها و شرایط مرزی در محدوده مدل آبخوان سرخس

ج- بررسی حساسیت مدل و تخمین تغذیه به آبخوان: در طول فرآیند واسنجی مقادیر پارامترهای مختلف از جمله تغذیه در بازه معقول تغییر داده شد و حساسیت مدل عددی در برآورد تغذیه مورد بررسی قرار گرفت. پس از اطمینان از حساسیت مدل به پارامتر تغذیه، میزان تغذیه به آبخوان تخمین زده شد و تغییرات زمانی و مکانی آن بر اساس نتایج مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت.

بحث

مدل مفهومی آبخوان سرخس

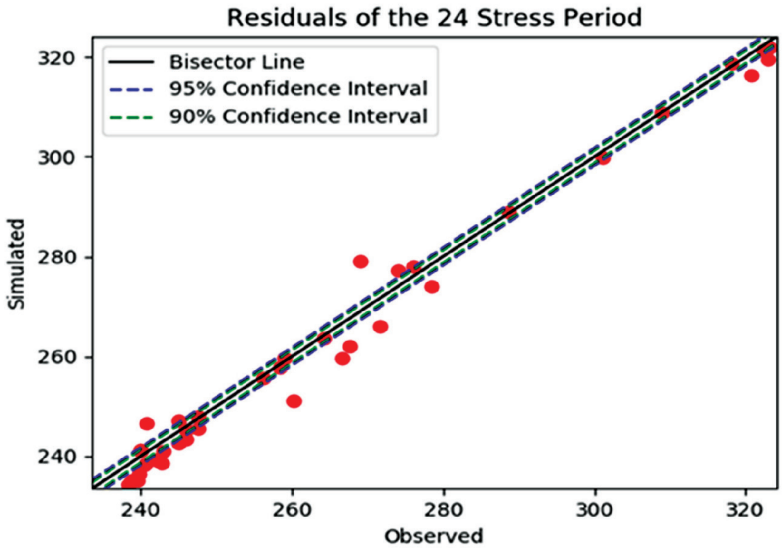
آبخوان سرخس با مساحت حدود ۸۷۴ کیلومترمربع از نوع آزاد است که در غرب رودخانه مرزی هریرود با روند به نسبت کشیده شمالی-جنوبی واقع شده است (شکل ۱). ضخامت رسوبات آبرفتی دربرگیرنده آبخوان از حداقل ۳۰ متر در بخش غربی به حداکثر ۱۳۰متر در بخش شرقی (مجاور رودخانه هریرود) و شمالی آبخوان افزایش می‌یابد. مهم‌ترین ورودی‌ها به آبخوان (شکل ۲)، تغذیه حاصل از نفوذ بارش و آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی (آبیاری) با مجموع ۲۷۹ میلیون مترمکعب در سال می‌باشند. لازم به ذکر است بر اساس نقشه هم‌پتانسیل و استفاده از معادله دارسی جریان ورودی زیرزمینی به آبخوان حدود ۲۰۰ میلیون متر مکعب محاسبه شده است (نبی‌زاده، ۱۳۹۷). تخلیه آبخوان با نرخ حدود ۳۱۰ میلیون مترمکعب در سال توسط چاه‌های بهره‌برداری (شکل ۴) به‌عنوان تنها خروجی آبخوان صورت می‌گیرد. در شرایط فعلی آبخوان با بیلان منفی و کسری مخزن حدود ۳۱ میلیون مترمکعب در سال مواجه می‌باشد. متوسط ضریب ذخیره آبخوان نیز حدود شش درصد برآورد شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

شبیه‌سازی عددی آبخوان سرخس

بعـــد از تبدیل مدل مفهومی آبخوان ســـرخس به مدل عددی در نرم‌افزار FREEWAT و اجرای مدل، واســـنجی آن به‌منظور انطباق مقادیر شبیه‌سازی شده سطح ایستابی و مقادیر مشاهده‌ای صحرایی انجام شده که همبستگی بالای مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای (شکل ۵) بیانگر دقت مدل در پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشد.



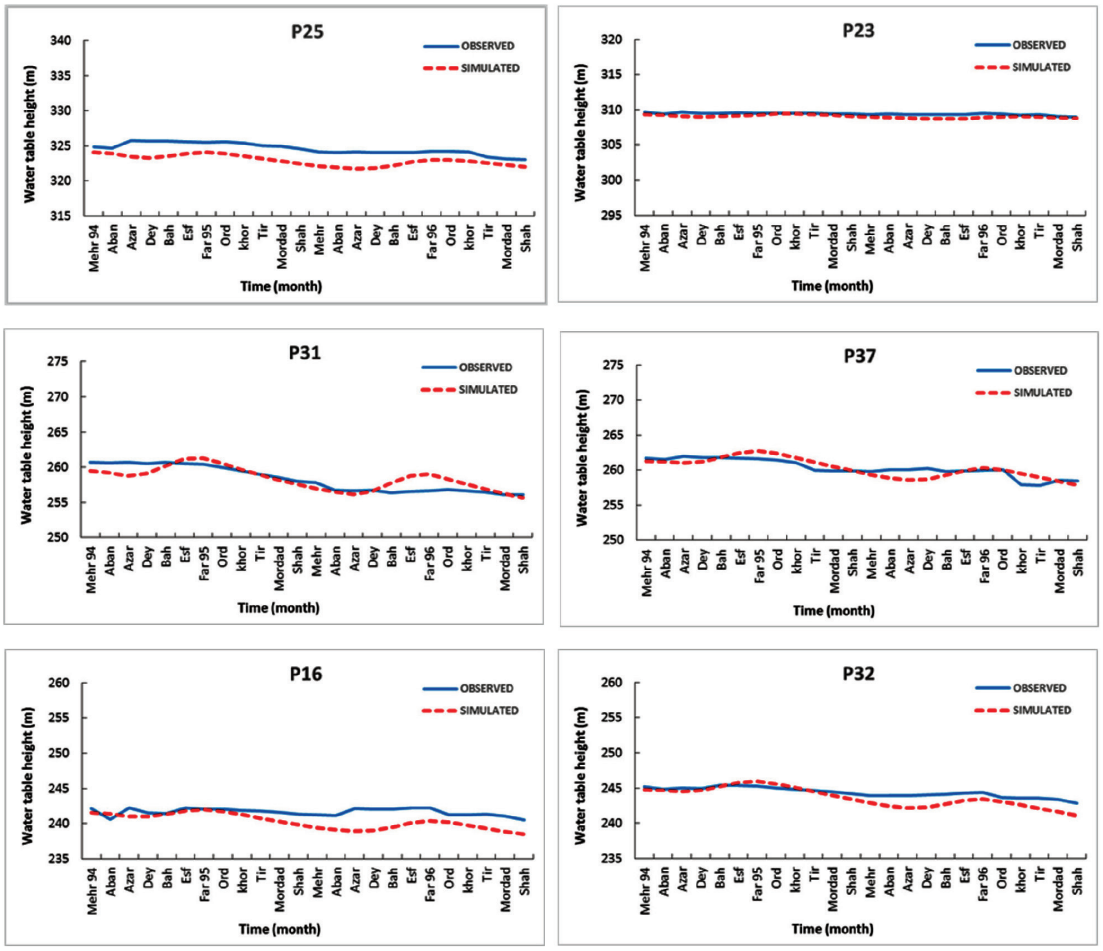
شکل ۵. انطباق مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در چاه‌های پیزومتری در انتهای دوره مدل‌سازی

مهم‌ترین نتیجه حاصل از واسنجی مدل انطباق مقادیر تراز آب زیرزمینی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای می‌باشد. در شکل ۶ هیدروگراف شبیه‌سازی شـــده توسط مدل و مشاهده‌ای پیزومترهـــا در دوره واســـنجی در تعـــدادی از پیزومترهای منتخب واقع در جنوب (P23 و P25)، مرکز (P37 و P31) و شمال آبخوان (P16 و P32) مقایسه شده است. انطباق تراز آب زیرزمینی مشـــاهده‌ای در پیزومترها و محاسباتی توسط مدل عددی در بازه دو ساله مدل‌سازی حاکی از شبیه‌سازی قابـــل قبول جریـــان در آبخوان با اســـتفاده از مدل عددی می‌باشد. لازم به ذکر اســـت به دلیل تعداد زیاد پیزومترها مقایســـه هیدروگراف محاسبه‌ای و مشـــاهده‌ای (شکل ۶) فقـــط در تعدادی از پیزومترهای واقع در بخش‌های مختلف آبخوان ارائه شـــده است. در مجموع مقایسه سطح ایستابی شبیه‌سازی‌شده توســـط مدل عددی و اندازه‌گیری‌شده در پیزومترها بیانگر دقت مدل عددی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در محدوده آبخوان سرخس می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین اطلاعات خروجی از مدل آب زیرزمینی، بیلان آب زیرزمینی محدوده مدل می‌باشـــد. جدول ۱ بیلان آبخوان ســـرخس محاسبه شده توسط مدل عددی MODFLOW را نشـــان می‌دهد. لازم به ذکر است مقادیر ارائه شـــده در این جدول به‌صورت تجمعی و برای دو سال شبیه‌سازی توسط مدل، محاسبه شده است و بنابراین نصف این مقادیر معرف مؤلفه‌های ورودی و خروجی سالانه (برحسب مترمکعب در سال) از آبخوان سرخس می‌باشند. مطابق نتایج بیلان مقدار تغذیه سالانه به آبخوان که از طریق آب برگشتی و بارش انجام شده حدود ۸۰ میلیون مترمکعب، جریـــان ورودی زیرزمینی حـــدود ۲۰۲ میلیون مترمکعب و تخلیه چاه‌ها حدود ۳۱۰ میلیون مترمکعب محاســـبه شده است. بر این اســـاس مجموع ورودی‌های سالانه به آبخوان حدود ۲۸۲ میلیون مترمکعب اســـت، درحالی‌که مجموع خروجی‌ها ۳۱۰ میلیون مترمکعب می‌باشـــد. کاهش حجم ذخیـــره آبخوان که معادل ۲۸ میلیون مترمکعب در ســـال محاسبه شده، نشان‌دهنده بیلان منفی و تأکیدی بر کسری مخزن سالانه آبخوان سرخس می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶. مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهداتی در پیزومترهای منتخب از بخش‌های جنوبی (P23 و P25)، مرکزی (P37و P31) و شمالی (P16 و P32) آبخوان سرخس

جدول ۱. بیلان آبخوان سرخس، محاسبه شده توسط مدل عددی

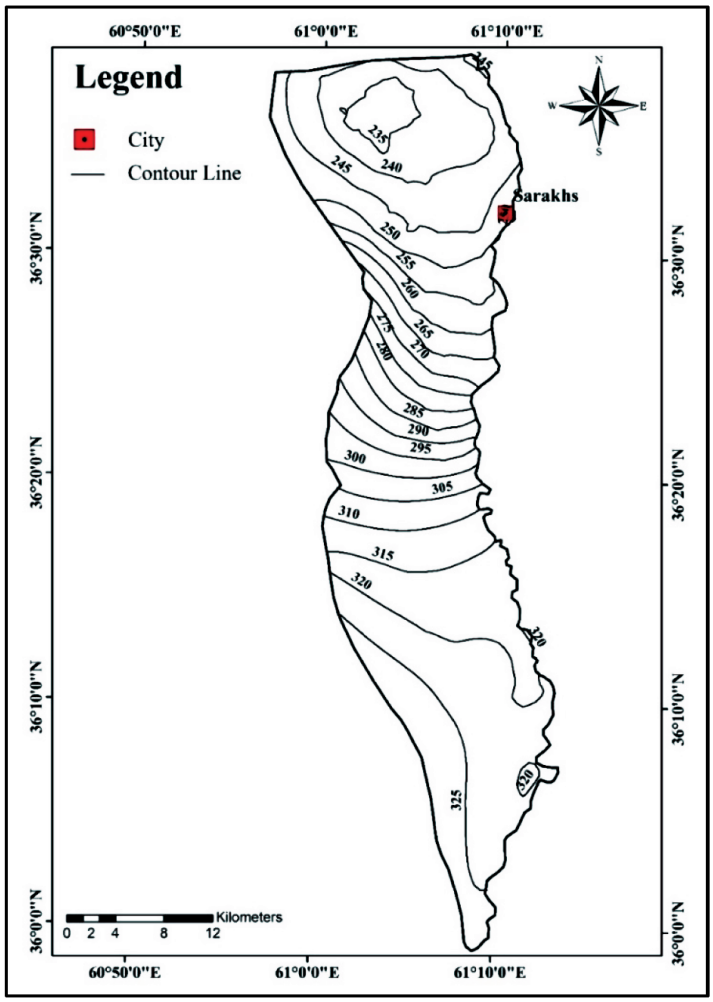
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1, STRESS PERIOD 24

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	295978528.0000	STORAGE =	546609.1250
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	404275488.0000	HEAD DEP BOUNDS =	583170.1875
RECHARGE =	160528496.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	860782464.0000	TOTAL IN =	1129779.2500
OUT:		OUT:	
STORAGE =	239168032.0000	STORAGE =	3732.7930
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	620868608.0000	WELLS =	1124762.1250
HEAD DEP BOUNDS =	747242.7500	HEAD DEP BOUNDS =	1283.5453
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	860783872.0000	TOTAL OUT =	1129778.3750
IN - OUT =	-1408.0000	IN - OUT =	0.8750
PERCENT DISCREPANCY =	-0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

www.SID.ir

Archive of SID

نقشه هم‌پتانسیل شبیه‌ســـازی شده آبخوان سرخس با استفاده از مدل عددی در شکل ۷ نشان داده شده است. بر این اساس سطح آب زیرزمینی در آبخوان از حداقل ۲۳۵ متر تا حداکثر ۳۲۵ متر متغیر می‌باشد. مطابق الگوی شبیه‌سازی شده سطح ایستابی (شکل ۷) جهت کلی جریان در آبخوان سرخس از جنوب به سمت شمال می‌باشد. تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در بخش‌های شمالی آبخوان باعث تخلیه متمرکز آبخوان و تشکیل مخروط افت و در نتیجه ایجاد منحنی‌های بسته تراز در این بخش شده است. طبق مطالعات انجام شده قبلی (مهندسین مشاور هیدروتک توس، ۱۳۹۳) جهت جریان از جنوب به سمت شـــمال است و در بخش شمالی دشت، تخلیه آبخوان انجام شده است. درحالی‌که به دلیل افزایش بهره‌بـــرداری، در حال حاضر آبخوان فاقد خروجی زیرزمینی می‌باشـــد و عمده تخلیه توسط چاه‌های بهره‌برداری صورت می‌گیرد. ایجاد منحنی‌های بســـته در خطوط هم‌پتانسیل نشـــان‌دهنده تغییر الگوی جریان آب زیرزمینی اســـت که می‌تواند تغییرات کیفی برای مثال شوری منابع آب زیرزمینی به دلیل هجوم آب‌های شـــور از خـــارج آبخوان به داخل آن در اثر معکوس‌شـــدگی جریان آب زیرزمینی را در پی داشته باشد. این موضوع بایستی در مدیریت این آبخوان مرزی مورد توجه قرار گیرد. مقایسه نقشـــه سطح ایستابی شبیه‌سازی شـــده آبخوان سرخس توسط مدل عددی (شکل ۷) و نقشه تراز رسم شده بر اساس مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در پیزومترها (شـــکل ۲) تاییدی بر توانایی مدل در شبیه‌سازی آبخوان است و بنابراین مدل تهیه شده جهت انجام مطالعات بعدی نظیر تخمین تغذیه قابل اعتماد می‌باشد.



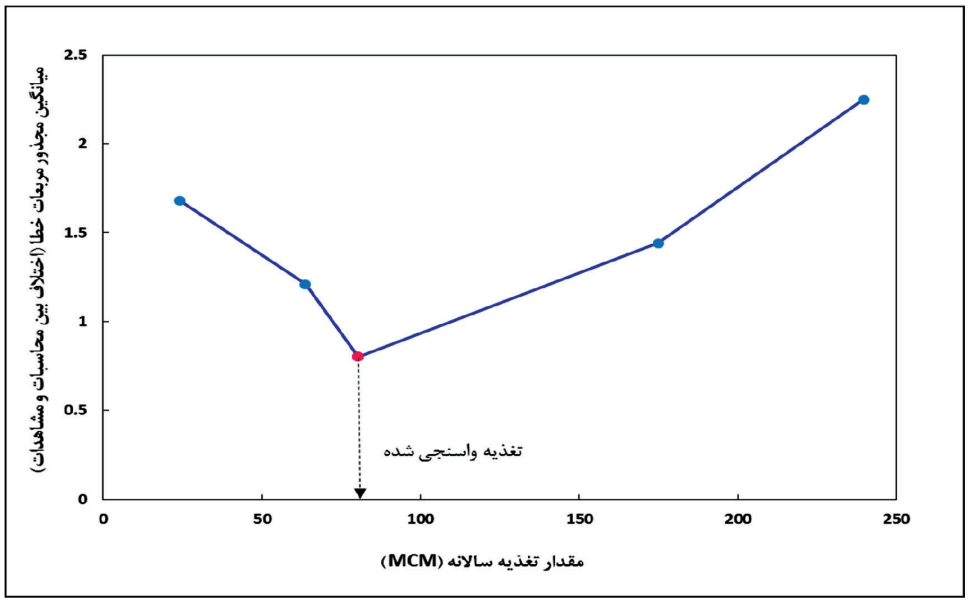
شکل ۷. نقشه سطح ایستابی آبخوان سرخس شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی (فروردین ۱۳۹۶)

www.SID.ir

Archive of SID

تخمین تغذیه و بررســـی تغییرات مکانی و زمانی آن

با توجه به اینکه هدف از تهیه مدل و شبیه‌سازی آبخوان سرخس تخمین تغذیه به آبخوان بوده است، ابتدا حساسیت مدل نسبت به تغذیه بررسی شد. بدین منظور تغییرات تابع هدف (اختلاف بین بار محاسبه‌ای و مشاهده‌ای) نسبت به تغییرات تغذیه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۸). همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل تهیه شده از آبخوان به‌طور کامل به تغییرات تغذیه حساس است، بنابراین می‌توان به نتایج آن در تخمین تغذیه اعتماد کرد.



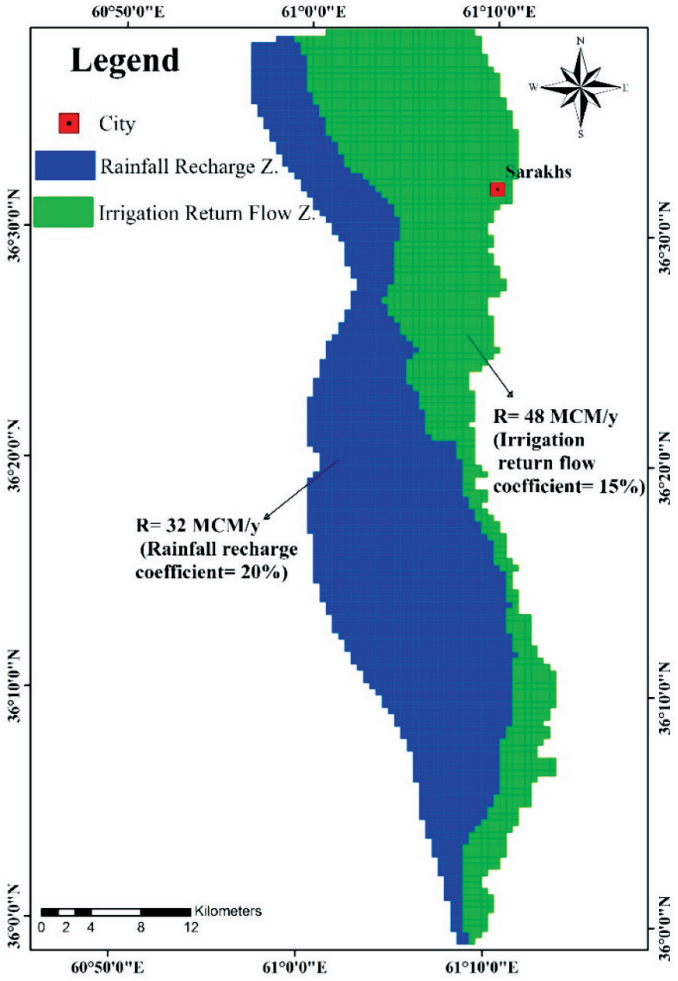
شکل ۸. بررسی حساسیت مدل عددی آبخوان سرخس به تغییرات تغذیه

بر اساس نتایج مدل میزان کل تغذیه به آبخوان سرخس برابر ۸۰ میلیون مترمکعب در سال است که از دو منبع بارش و آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی تأمین شده است. تغییرات مکانی تغذیه به آبخوان ســـرخس در شکل ۹ نشان داده شـــده است. تغذیه ســـطحی به آبخوان سرخس در دو بخش شرقی و غربی تفکیک شده است. بخش شرقی آبخوان به علت تمرکـــز زمین‌های زراعی به‌عنوان محدوده تاثیر آب برگشتی و بخش غربی به دلیل وجود رسوبات ماسه‌ای بادی و نفوذپذیری بالا به‌عنوان محدوده تغذیه ناشـــی از بارش در نظر گرفته شـــده اســـت. مقدار تغذیه سالانه ناشی از بارش برابر ۳۲ میلیون مترمکعب در ســـال اســـت که با توجه به میانگین بارش ســـالانه در محدوده آبخوان سرخس (۱۶۳ میلی‌متر در ســـال) این حجم تغذیه معادل حدود ۲۰ درصد بارش سالیانه است و بنابراین ضریب تغذیه ناشی از بارش در آبخوان سرخس برابر ۲۰ درصد معرفی می‌شود. تغذیه ناشی از کشـــاورزی که در بخش شرقی آبخوان روی می‌دهد، برابر ۴۸ میلیون مترمکعب در سال است که این حجم تغذیه برابر حدود ۱۵ درصد کل حجم آب اســـتفاده شده در کشاورزی می‌باشد. بنابراین ضریب آب برگشتی کشاورزی در محدوده آبخوان سرخس نیز برابر ۱۵ درصد معرفی می‌شود.

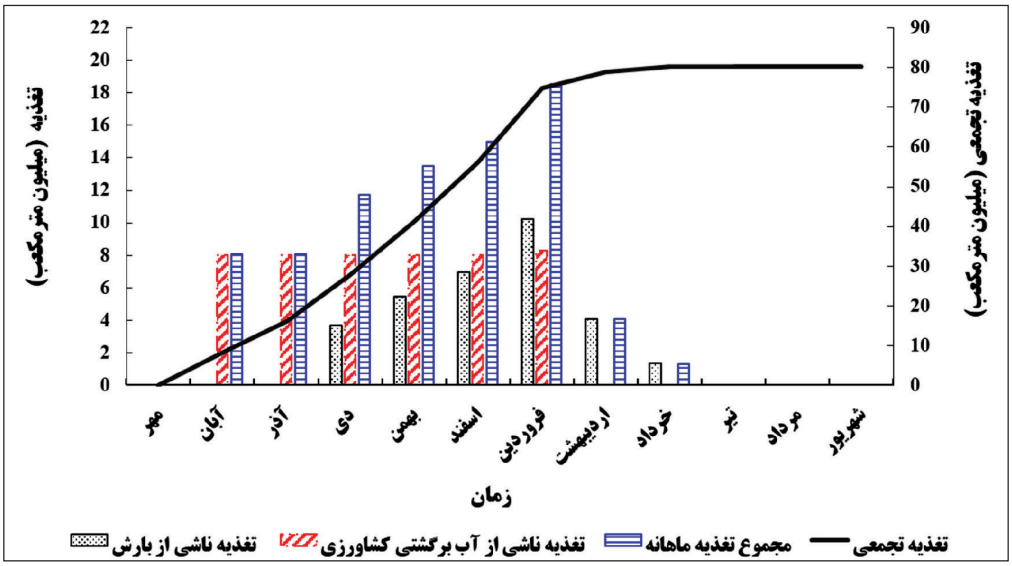
تغییرات زمانی تغذیه به آبخوان سرخس بر اساس نتایج مدل عددی در شکل ۱۰ رسم شده است. مقدار تغذیه سالانه ناشی از بارش به آبخوان از حداقل صفر تا حداکثر ۱۰ میلیون مترمکعب در ماه‌های مختلف متغیر می‌باشد. حداقل مقدار تغذیه ناشـــی از بارش در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر است و حداکثر آن در فروردین‌ماه روی می‌دهد. سری زمانی تغییرات حجم آب برگشـــتی در طول سال (شکل ۱۰) نشان می‌دهد عمده تغذیه ناشی از آب برگشتی کشاورزی مربوط به نیمه اول سال آبی (ماه‌های آبان تا فروردین) است که بر اثر مصرف آبیاری بیش از نیاز محصولات زراعی روی داده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹. توزیع مکانی تغذیه در محدوده آبخوان سرخس بر اساس نتایج مدل عددی



شکل ۱۰. تغییرات زمانی تغذیه به آبخوان سرخس بر اساس نتایج مدل عددی

www.SID.ir

Archive of SID

در این دوره از سال به دلیل کاهش دمای هوا و کم بودن عمق ریشه محصولات زراعی، میزان تبخیر و تعرق (نیاز آبی) اندک بوده، لیکن کشاورزان به‌صورت سنتی آبیاری مازاد بر نیاز محصول انجام می‌دهند که این موضوع برگشت آب مازاد بر نیاز آبی گیاه به‌صورت تغذیه به آبخوان را در پی دارد. لازم به ذکر است نتایج حاصل از مدل‌سازی در شبیه‌سازی تغییرات زمانی آب برگشتی کشاورزی در آبخوان سرخس با مطالعات اندازه‌گیری مستقیم آب برگشتی کشاورزی با استفاده از لایسیمترها در مناطق نیمه‌خشک ایران (Jafari et al., 2012) همخوانی دارد. در مجموع تغذیه تجمعی ناشی از بارش و آب برگشتی در ماه‌های دی تا فروردین باعث افزایش حجم مخزن آب زیرزمینی و بالا آمدن سطح ایستابی در این دوره زمانی از سال می‌شود. مطابق نتایج حاصل از مدل عددی حداکثر میزان مجموع تغذیه ناشی از بارش و آب برگشتی کشاورزی حدود ۱۸ میلیون مترمکعب بوده که در فروردین‌ماه روی می‌دهد. آبخوان سرخس در دوره تابستان و اوایل پاییز (ماه‌های تیر تا مهر) فاقد هرگونه تغذیه سطحی (مجموع بارش و آب برگشتی کشاورزی) بوده که این موضوع با نبود بارندگی در این دوره و همچنین افزایش میزان تبخیر و تعرق که سبب کاهش و یا توقف آب برگشتی کشاورزی می‌گردد، همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تغذیه به آبخوان سرخس از طریق مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی توسط MODFLOW در نرم‌افزار FREEWAT برآورد شده و تغییرات مکانی و زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل عددی در انتهای دوره واسنجی و صحت‌سنجی بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی سطح ایستابی، الگوی جریان آب زیرزمینی و مولفه‌های بیلان آبخوان می‌باشد. مدل تهیه شده از آبخوان نسبت به تغییرات تغذیه حساس بوده و بنابراین جهت برآورد تغذیه و تغییرات زمانی و مکانی مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس نتایج مدل عددی مقدار تغذیه سالانه آبخوان سرخس از دو منبع بارندگی و آب برگشتی کشاورزی حدود ۸۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است. تغذیه ناشی از آب برگشتی کشاورزی به میزان حدود ۴۷ میلیون مترمکعب در سال در محدوده زمین‌های کشاورزی واقع در بخش شرقی آبخوان و تغذیه ناشی از بارش به میزان ۳۲ میلیون مترمکعب در سال از طریق شبکه آبراهه‌ای توسعه‌یافته در بخش غربی آبخوان روی می‌دهد. با توجه به الگوی کشت محصولات زراعی در این منطقه تغذیه ناشی از آب برگشتی فقط در فصول پاییز و زمستان صورت گرفته و با عنایت به الگوی بارش منطقه، تغذیه ناشی از بارش فقط در فصول بارندگی (آبان تا اردیبهشت) روی می‌دهد. بر اساس نتایج این تحقیق ضریب تغذیه ناشی از بارش حدود ۲۰ درصد بارش سالیانه و ضریب جریان آب برگشتی ناشی از آبیاری حدود ۱۵ درصد مجموع تخلیه سالانه چاه‌های بهره‌برداری تخمین زده شده است. با توجه به مشابهت شرایط آبخوان‌ها در سایر نقاط ایران با آبخوان سرخس، نتایج حاصل از این پژوهش در تعیین ضرایب تغذیه ناشی از بارش و آب برگشتی کشاورزی و تغییرات زمانی و مکان‌ها در سایر مطالعات به‌ویژه محاسبات بیلان هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها و در راستای مدیریت منابع ارزشمند آب زیرزمینی سودمند و قابل استفاده می‌باشد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری مدیران و کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی در طی انجام این تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- شرکت ملی نفت ایران، ۱۹۸۳. نقشه زمین‌شناسی سرخس با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰.
- مهندسین مشاور هیدروتک توس، ۱۳۹۳. گزارش فنی پیشنهاد تمدید ممنوعیت دشت سرخس. کارفرما: شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی،۲-۶.
- نبی‌زاده، ن.، ۱۳۹۷. تخمین تغذیه سالانه به آبخوان سرخس با استفاده از FREEWAT، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،۵۳-۵۶.
- Baalousha, H., 2005. Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza strip. Palestine, Environmental Geology,

www.SID.ir

Archive of SID

48، 889-900.

- Bauer، H. H. and Mastin، M. C.، 1997. Recharge from precipitation in threeb small glacial-till mantled catchments in the Puget sound Lowland، Washington. US Geological Survey Water Resources Investigation Report، 96-4219.

- Brini، N. and Zammouri، M.، 2016. Groundwater recharge modelling in semi-arid regions؛ a case study of El Khairat alluvial plain (Tunisia). Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology، 49،3، 229-236.

- Coelho، V. H. R.، Montenegro، S.، Almeida، C. N.، Silva، B. B.، Oliveira، L. M.، Gusmão، A. C. V. and Montenegro، A. A.، 2017. Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. Journal of Hydrology، 548، 1-15.

- Dripps، W.R.، Hunt، R.J. and Anderson، M.P.، 2006. Estimating recharge rates with analytic element models and parameter estimation، Groundwater، 44، 47-55.

- Ebrahimi، H.، Ghazavi، R. and Karimi، H.، 2016. Estimation of groundwater recharge from the rainfall and irrigation in an arid environment using inverse modeling approach and RS. Water Resources Management، 30،6، 1939-1951.

- Healy، R. W.، 2010. Estimating Ground Water Recharge، Cambridge University Press،1-14.

- Herrmann، F.، Jahnke، Ch.، Jenn، F.، Kunkel، R.، Voigt، H.، Voigt، J. and Wendland، F.، 2009. Groundwater recharge rates for regional groundwater modelling: a case study using GROWA in the Lower Rhine lignite mining area، Germany. Hydrogeology Journal، 17، 2049-2060.

- Izady، A.، Abdalla، O.، Amerjeed، M.، Chen، M.، Al-Maktoumi، A.، Kacimov، A. and Al-Mamari، H.، 2019. Recharge estimation of Hardrock-Alluvium Al-Fara Aquifer، Oman using multiple methods. In Advances in Sustainable and Environmental Hydrology، Hydrogeology، Hydrochemistry and Water Resources، 313-315، Springer، Cham.

- Jafari، H.، Raeisi، E.، Zare، M. and Haghighi، A.A.K.، 2012. Time series analysis of irrigation return flow in a semi-arid agricultural region، Iran. Archives of Agronomy and Soil Science، 58،6،.673-689.

- Rushton، K.، 1997. Recharge from permanent water bodies. In: Simmers I (ed) Recharge of phreatic aquifers in (semi) arid areas. AA Balkema، Rotterdam، 215-255.

- Scanlon، B.R.، Healy، R.W. and Cook، P.G.، 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal،10،18-39.

- Stoertz، M. W. and Bradbury، K. R.، 1989. Mapping recharge area using a groundwater flow model: a case study، Groundwater، 27، 220-228.

- Tideman، C. R.، Goode، D. J. and Hsieh، P. A.، 1997. Numerical simulation of groundwater flow through glacial deposits and crystalline bedrock in the Mirror Lake area، Grafton country، New Hampshire. US Geological Survey Professional Paper 1572.

- Uribe، J.، Muñoz، J. F.، Gironás، J.، Oyarzún، R.، Aguirre، E. and Aravena، R.، 2015. Assessing groundwater recharge in an Andean closed basin using isotopic characterization and a rainfall-runoff model: Salar del Huasco basin، Chile، Hydrogeology Journal، 23،7، 1535-1551.

www.SID.ir