



Simulating the Rehabilitation of an Over-Extracted Aquifer by Different Management Scenarios in the Ravansar-Sanjajabi Catchment in Kermanshah

J. Porhemmat^{1*}, M. Altafi Dadgar²
and R. Porhemmat³

Abstract

Rising water demands and over-extraction of groundwater have caused critical status in more than 50% of the aquifers in Iran. Simulating complex condition of such aquifers and selecting an appropriate management approach are required to compensate drawdown. Therefore, this study aimed to provide a management approach for the Ravansar-Sanjajabi aquifer in Kermanshah, an aquifer under a severe stress during last decades, using the MODFLOW model. After calibrating and evaluating the model, as well as providing a spatial distribution map for the actual drawdown during the period of 2007-2015, the aquifer is divided into four drawdown zones, including 0 to 5, 5 to 10, 10 to 20, and 20 to 45 meters. Several options of combining scenarios were then applied to compensate the drawdown in each of the zones. The first scenario included the continuation of the last eight-year condition of sources, sinks and recharge of the aquifer, which resulted in a 7.2 m decline during the next eight years. In the second and third scenarios, with the effects of drought and wet conditions, the results showed that groundwater level would decline by 8.4 and 5.2 m, respectively. The results of the first three scenarios showed that the effect of climate fluctuations is not the main factor affecting the groundwater level decline. In the fourth scenario different combinations of 10% to 70% reduction in pumping rates were applied and the results showed that the combination of 10% reduction in zone 1 and 20% reduction in other zones provides the best results in improving aquifer conditions.

Keywords: Management Scenarios, Modeling, Over-Extraction, Ravansar-Sanjajabi, MODFLOW Model.

Received: February 7, 2018

Accepted: July 20, 2018

شبیه‌سازی تعادل بخشی آبخوان در معرض افت شدید با اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی - مطالعه موردی: حوضه روانسر - سنجایی کرمانشاه

جهانگیر پرهمت^{۱*}، مجید الطافی دادگر^۲ و رسول پرهمت^۳

چکیده

افزایش تقاضا و بهره‌برداری بیش از حد از آبخوان‌ها در ایران باعث شده تا بیش از ۵۰ درصد آن‌ها در شرایط بحرانی قرار گیرند. برای جبران و توقف افت تراز سطح آب زیرزمینی، نیاز به مدیریت جامع منابع آب بوده که لازمه‌اش شبیه‌سازی شرایط پیچیده و انتخاب رویکرد مدیریتی مناسب می‌باشد. لذا پژوهش حاضر با هدف ارائه‌ی رویکرد مدیریتی مبتنی بر شرایط یک آبخوان تحت تنش شدید، با استفاده از مدل MODFLOW انجام شده است. بدین منظور آبخوان روانسر - سنجایی کرمانشاه، که ۱۵ متر افت در طول ۲۳ سال داشته، انتخاب شد. پس از واسنجی و ارزیابی مدل و نیز تهیه نقشه توزیع مکانی افت واقعی دوره ۹۴-۱۳۸۶، آبخوان به چهار پهنه افت شامل ۰ تا ۵، ۵ تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۵ متر تفکیک و سپس گزینه‌های مختلفی از ترکیب سناریوها برای جبران افت هر کدام از این پهنه‌ها اعمال شد. سناریوی اول شامل شرایط هشت سال اخیر منابع، مصارف و تغذیه آبخوان بوده که نتایج حاکی از ۷/۲ متر افت طی هشت سال آتی خواهد بود. در سناریوهای دوم و سوم با تأثیر شرایط خشکسالی و ترسالی، نتایج نشان داد که سطح آب به ترتیب ۸/۴ و ۵/۲ متر افت خواهد نمود. نتایج سه سناریوی اول نشان داد تأثیر نوسانات اقلیمی عامل اصلی تأثیرگذار بر افت سطح آب نیست. نتایج سناریوی چهارم با ترکیب‌های متفاوت ۱۰ تا ۷۰ درصدی کاهش نرخ بهره‌برداری نشان داد ترکیب ده درصدی در پهنه یک و ۲۰ درصدی در سایر پهنه‌ها بهترین نتیجه را در بهبود وضعیت آبخوان فراهم می‌نماید.

کلمات کلیدی: سناریوهای مدیریتی، مدل‌سازی، بهره‌برداری بیش از حد، روانسر - سنجایی، مدل MODFLOW.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۴/۲۹

1- Associate Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran E-mail: Porhemmat@scwmri.ac.ir

2- Ph.D. Candidate, Kharazmi University, Tehran, Iran.

3- Ph.D. Candidate, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

*- Corresponding Author

۱- دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه کنتربری، کریستچرچ، نیوزلند.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

مطالعات مدل‌سازی صورت گرفته در رابطه با بررسی شرایط زمانی و مکانی آب‌های زیرزمینی و احیای آبخوان‌ها دو فاکتور عمده را شامل می‌شود. این فاکتورها بررسی نرخ تغذیه و نرخ بهره‌برداری از آبخوان‌ها بوده است. بطور مثال نتایج بررسی سناریوهای مدیریتی در یک دوره ۳۰ ساله در حوضه آبریز آرلینگتون^۱ با استفاده از مدل MODFLOW نشان داد که پمپاژ طولانی مدت از چاه‌های منطقه بدون تغذیه مصنوعی آبخوان، باعث کاهش ذخیره تجدیدپذیر آن شده است (Manghi et al., 2012). مدل عددی FEFLOW در شبیه‌سازی تغییرات منطقه‌ای آب‌های زیرزمینی در منطقه‌ای در شمال غربی چین با اعمال سه سناریوی مدیریتی و اثر آن بر میزان افت سطح آب در آبخوان مورد استفاده قرار گرفته است (Feng et al., 2010). در سناریوی یک که ادامه روند موجود بوده است، برای یک دوره طولانی ۲۰ ساله سطح آب زیرزمینی بیش از ۳۰ متر افت نشان داد. در سناریوی دوم، که با کاهش مساحت مناطق کشاورزی تعریف شد، کاهش افت آب بیشتر از سناریوی سوم یا ذخیره آب آبیاری (سناریوی سوم ذخیره آب با افزایش راندمان آبیاری است) بوده است. در مطالعه‌ی ذکر شده شرایط مرزی مدل بصورت ثابت در نظر گرفته شده و نیاز به بررسی شرایط آبخوان با تعریف شرایط مرزی متغیر نسبت به زمان، ضروری دانسته شده است. از مدل عددی FEFLOW جهت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و مدل دوبعدی SINM جهت بررسی نفوذ جبهه‌ی شور برای پیش‌بینی شرایط آبخوان استفاده شده است (Gad et al., 2015). در دو سناریوی که یکی ادامه وضع موجود و دیگری تعریف نرخ مجاز پمپاژ برای آبخوان بود نتیجه‌گیری شد که نرخ افت در دومی به ۵۰ درصد افت سناریوی یک که ۱۰ متر بوده کاهش می‌یابد. این فاکتورها (بررسی تغذیه و بهره‌برداری) با بررسی اثرات تغییرات اقلیمی نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Andreas et al., 2014; Duran-Encalada et al., 2017; Boughariou et al., 2018). بیشتر مطالعات فوق از یک روش کلی جهت بررسی اثرات فاکتورهای بهره‌برداری، تغذیه و تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند. برای مثال اثر تغذیه یا کاهش بهره‌برداری بر احیای افت ایجاد شده با در نظر گرفتن افت متوسط کل آبخوان صورت پذیرفته است. این در حالی است که بخش‌هایی از آبخوان در نتیجه‌ی بهره‌برداری بیشتر و همچنین شرایط هیدروژئولوژیکی نامناسب، دارای افت بیشتری خواهد بود. از طرف دیگر قابلیت کاربرد سناریوهای مدیریتی وابسته به شرایط زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و هیدرولوژیکی مرتبط با هر منطقه می‌تواند متفاوت باشد. از این‌رو، مطالعه حاضر با استفاده از مدل عددی MODFLOW در جهت بررسی سناریوهای قابل کاربرد و جلوگیری

بحران آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به یک مسأله مهم تبدیل شده است که در این میان آب‌های زیرزمینی به عنوان یکی از مهمترین مؤلفه‌های منابع آب تحت افت شدید قرار گرفته‌اند. بنابراین چنین شرایطی نیاز ضروری به مطالعه جامع منابع آب زیرزمینی را بیش از پیش آشکار می‌سازد (Mahmoudi et al., 2017). افزایش تقاضای آب برای مصارف مختلف از یک طرف و تغییرات اقلیمی از طرف دیگر، تأمین آب از منابع آب شیرین را با مشکلاتی مواجه ساخته است (Gleeson et al., 2012). مدیریت ضعیف منابع در دسترس و رشد جمعیت، تأمین نیاز آبی و دسترسی این منابع را در دراز مدت با چالش و عدم قطعیت مواجه ساخته است (Sophocleous, 2010). برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها باعث برهم‌خوردن تعادل بین نرخ تغذیه و تخلیه‌ی این آبخوان‌ها و در نتیجه افت شدید سطح ایستابی آن‌ها شده که خود باعث مشکلاتی از قبیل کاهش منابع آب شیرین، هجوم آب شور و نیز نشست زمین شده است. همچنین، بهره‌برداری بی‌رویه از آبخوان‌ها تأثیرات نامطلوبی بر ذخیره آنها گذاشته (Praveena and Aris, 2010). به طوری که خشکسالی‌های پیاپی و تغییرات احتمالی اقلیمی می‌تواند موضوع را بحرانی‌تر نماید. بنابراین شناسایی، ارزیابی و احیای سیستم‌های آب زیرزمینی توجه محققان را امروزه به خود جلب کرده است. این موارد به همراه پیچیدگی سیستم آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که روش‌های مدیریتی سنتی نمی‌توانند جوابگوی فراهم بودن منابع آب در آینده باشد. با این وصف شبیه‌سازی چنین سیستم‌های پیچیده‌ای، استفاده از مدل‌سازی سیستم را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. بنابراین، از مدل‌های عددی می‌توان جهت شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده و درک آسان‌تر و بهتر آن برای ارزیابی امکان اجرای سناریوهای مدیریتی استفاده نمود (Martínez-Santos et al., 2010). مدل‌سازی در پژوهش‌های مختلفی برای تعیین سناریوهای مدیریتی منابع آب زیرزمینی مانند بررسی استخراج بی‌رویه جهت کشاورزی و ارزیابی در دسترس بودن آب زیرزمینی (Xuesen et al., 2005; Feng et al., 2010; Zhang et al., 2012; Janatrostami et al., 2014)، فرونشست‌های زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی (Uddameri and Kuchanur, 2007) و نفوذ آب شور دریا به آبخوان‌های ساحلی (Sherif et al., 2012; Kourgialas et al., 2015) در سراسر جهان انجام شده است. همچنین، مدل‌سازی به عنوان ابزاری در پیش‌بینی شرایط آبخوان، تبادل بین منابع آب و یا اثرات تغییرات اقلیمی بر این منابع در جهت بهبود اهداف مدیریتی آبخوان نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Allen et al., 2004; Vazquez-Sune et al., 2006; Abboa and Gev, 2008; Mori, 2009; Akram et al., 2012; Sidiropoulos et al., 2012; Manghi et al., 2012; Sidiropoulos et al., 2015;

این برف‌ها باعث تغذیه سازندهای کارستی اطراف آبخوان آبرفتی می‌شوند. روانسر رودخانه اصلی منطقه می‌باشد که از سه شاخه نهر اصلی، نهر چپ و نهر راست تشکیل شده و از باختر به خاور جریان دارد. این رودخانه با خروج از منطقه و دریافت رودخانه مرک، رودخانه قره‌سو را تشکیل داده که از سرشاخه‌های اصلی روخانه کرخه در جنوب غرب ایران می‌باشد.

از دیدگاه هیدروژئولوژی، آبخوان روانسر-سنجایی یک آبخوان آزاد بوده که در بخشی از محدوده‌های آبخوان در اثر وجود رسوبات ریزدانه به صورت موضعی محبوس می‌شود. آبخوان یاد شده دارای ضخامت بیشینه حدود ۲۱۰ متر در مرکز دشت بوده که به سمت حاشیه کاهش می‌یابد (Zamikav Gostar, 2011). مواد آبرفتی تشکیل دهنده آبخوان در بخش‌های مرکزی ریزدانه بوده و به سمت حواشی آبخوان درشت دانه می‌شوند. تراز سطح آب زیرزمینی این آبخوان بین ۱۳۱۷ تا ۱۳۵۲ متر از سطح آبهای آزاد به ترتیب از بخش‌های جنوب غربی به بخش‌های شرقی در تغییر است.

از افت بیشتر آبخوان تحت شرایط تنش شدید با پهنه‌بندی افت آن، لحاظ نوسانات اقلیمی و تعریف شاخصی تحت عنوان بازیافت افت (Recovery Index) صورت پذیرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه، زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

برای این پژوهش دشت روانسر-سنجایی در استان کرمانشاه با مساحتی بالغ بر ۵۶۰ کیلومتر مربع انتخاب شده است. این دشت در حدفاصل ۴۶ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۴۶ دقیقه طول جغرافیایی شرقی و ۳۴ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۱ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی و با ارتفاع متوسط ۱۳۲۰ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوای نیمه‌خشک تا نیمه‌مرطوب بوده و بارندگی‌های آن عمدتاً در زمستان و بهار رخ می‌دهند. متوسط بارندگی و درجه حرارت سالانه منطقه به ترتیب ۵۰۷ میلی‌متر و ۱۴/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Eghlim Tarh, 2008). بارندگی در ارتفاعات بیشتر به شکل برف رخ داده و آب حاصل از ذوب

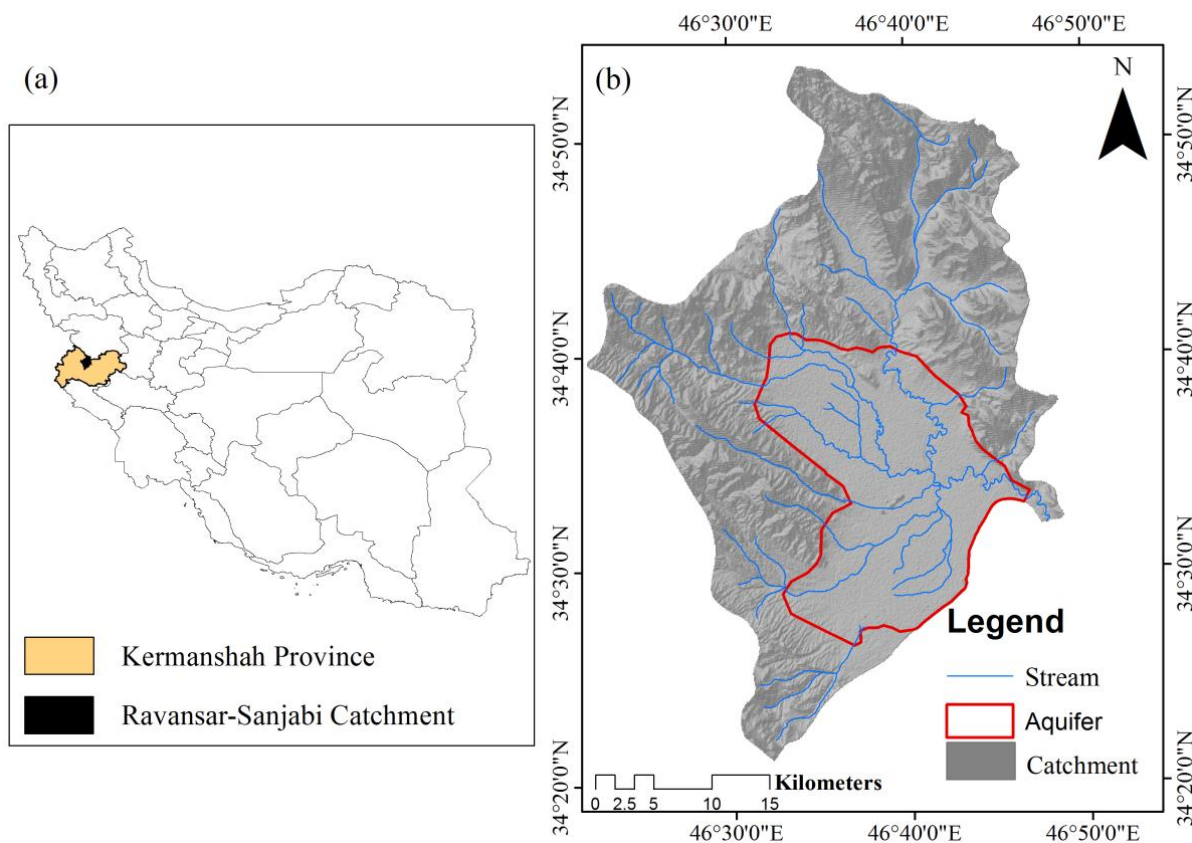


Fig. 1- Location of Ravansar-Sanjabi catchment in Kermanshah province (a) and boundary of Ravansar-Sanjabi catchment and aquifer (b)

شکل ۱- موقعیت حوزه آبریز روانسر-سنجایی در استان کرمانشاه (a)، محدوده حوزه آبریز و آبخوان روانسر-سنجایی (b)

سازند مشرف به دشت که سراسر آن را پوشش داده‌اند غالباً ریزدانه یا با دانه‌بندی متوسط می‌باشند. هم‌چنین، رسوبات آبرفتی حاشیه دشت نیز به دلیل نزدیکی به کوهپایه از دانه‌بندی نسبتاً درشت‌تری برخوردار هستند.

۲-۲- جمع‌آوری و تأمین داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز

داده‌های مورد نیاز در مطالعه حاضر شامل داده‌های بلند مدت تراز سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای منطقه در طول دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۴، داده‌های هواشناسی و هیدرولوژی، منابع و مصارف آب در طول سال‌های آماری ۸۴-۱۳۸۳ و ۸۷-۱۳۸۶، لاگ چاه‌های حفاری شده در دشت، داده‌های ژئوفیزیک، نقشه رقوم ارتفاعی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز از آرشیو شرکت آب منطقه‌ای استان کرمانشاه و سازمان نقشه‌برداری ایران در طول دوره ۹۴-۱۳۷۰ جمع‌آوری شده است.

عمق سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی آبخوان حدود ۶ متر بوده و به سمت ارتفاعات به حدود ۶۰ متر می‌رسد. منحنی تراز سطح آب زیرزمینی در ارتفاعات به هم نزدیک شده و به سمت مرکز دشت از هم فاصله می‌گیرند که خود نشان‌دهنده تغذیه آبخوان از سازندهای کارستی حاشیه دشت می‌باشد. جهت جریان آب زیرزمینی از شمال و جنوب غرب به سمت مرکز و شرق منطقه می‌باشد. جریان آب‌های زیرزمینی از مرزهای شرقی آبخوان خارج شده و در بخش‌هایی تأمین کننده بخشی از جریان پایه رودخانه قره‌سو می‌باشد. از دیدگاه زمین‌شناسی این منطقه در پهنه سنندج- سیرجان جای گرفته است. این پهنه‌بندی بر این اساس است که در اغلب نواحی واحدهای رسوبی و دگرگونی رانده و گسلیده سنندج- سیرجان و توده آهکی نابرجای بیستون برون‌زدگی دارد. قدمت کهن‌ترین سنگ‌های منطقه به تریاس می‌رسد و نهشته‌های آهکی مزوزوئیک و پادگانه‌های آبرفتی جوان کواترنری گسترده‌ترین واحدهای منطقه می‌باشند (شکل ۲). به‌علاوه همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد، سازندهای اطراف دشت غالباً آهکی، مارنی و مارنی- آهکی بوده و آبرفت‌های حاصل از فرسایش

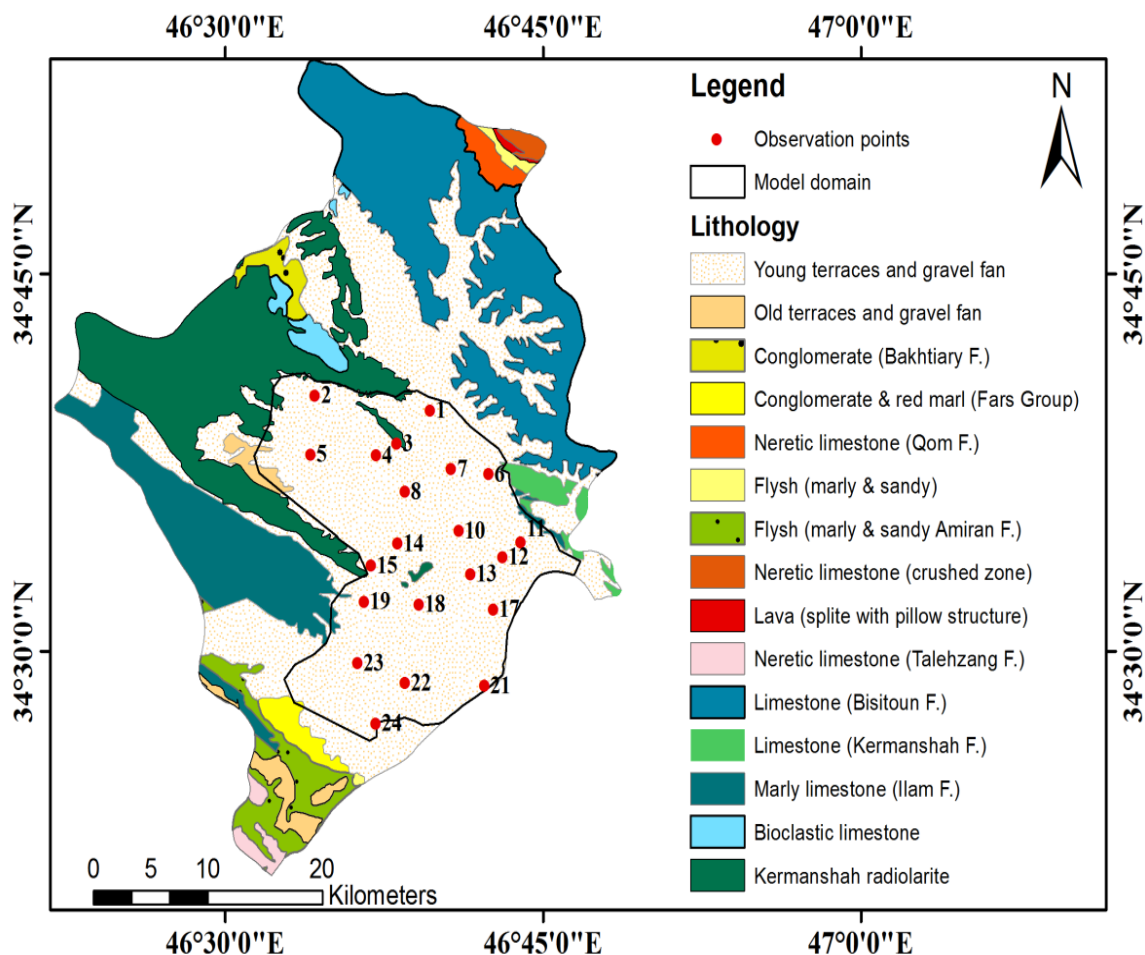


Fig. 2- Geological map of the study area (Eghlim Tarh, 2008)
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (Eghlim Tarh, 2008)

مطالعات مختلفی اثبات شده است (Candela et al., 2014; Switzman et al., 2015). اطلاعات سطح آب در ۲۴ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت، توپوگرافی سطح و کف آبخوان، منابع و مصارف، رودخانه‌ها، تغذیه پخش شده و پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از رابط‌های مربوطه به هر بخش که از قابلیت‌های نرم‌افزار GMS است، به مدل فراخوانی شده است. منطقه‌ای از آبخوان به وسعت ۲۷۶ کیلومتر مربع و بصورت تک لایه مدل‌سازی شد. بدین منظور محدوده مدل به ۱۳۴ ردیف و ۱۷۳ ستون و با ابعاد سلول ۲۰۰ در ۲۰۰ متر تفکیک شد. با توجه به نوسانات زیاد تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان، انتخاب ابعاد سلول‌های نسبتاً کوچک جهت بررسی بهتر توزیع تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان ضرورت داشت. جهت حل معادلات تفاضل‌های محدود از بسته حل پیش شرط گرادیان مزدوج^۲ استفاده شده است. برای تعیین شرایط مرزی در مدل سعی شد تا مرزهای مدل در محدوده‌ای از آبخوان که دارای اطلاعات کامل سطح آب توسط پیژومترها در دسترس است در حلقه بیرونی پیژومترها بسته شود، به عبارت دیگر مرز مدل حد کوه و دشت نیست. بدین منظور با استفاده از تراز سطح آب زیرزمینی، مرزهای ورودی و خروجی مدل به صورت شرایط مرزی بار عمومی تعیین گردید. همچنین مرزهای بالایی (سطح) و پایینی (کف) آبخوان به ترتیب به صورت مرز سطح آب زیرزمینی با مولفه‌ی تغذیه از بالا و مرز نفوذناپذیر تعریف شدند.

پس از ساخت مدل مفهومی و نسبت دادن آن به سلول‌های شبکه، ابتدا یک دوره یک ماهه از سال آبی ۸۴-۱۳۸۳ (دارای آمار منابع و مصارف آب)، انتخاب شد که تنش‌های موجود بر آبخوان حداقل بوده است.

همچنین دو پیمایش صحرائی جهت ارزیابی پیش‌بینی‌های مدل در چاه‌های مشاهده‌ای صورت پذیرفت. در جدول ۱، مقادیر منابع و مصارف (شامل برداشت از چاه‌ها، تغذیه از بارندگی، آبراه‌ها و آب برگشتی از کشاورزی) و همچنین تغییرات متوسط سالانه تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان برای سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ ارائه شده است. با توجه به بالابودن عمق سطح آب زیرزمینی در آبخوان (بیش از ۶ متر)، مولفه‌ی تبخیر از سطح آبخوان در نظر گرفته نشد. همچنین، بر اساس نتایج آزمایشات پمپاژ صورت گرفته در ۴ حلقه چاه اکتشافی در آبخوان، مقدار قابلیت انتقال بین ۳۰۰ تا ۱۴۰۰ مترمربع در روز برآورد شده است. با توجه به تعداد اندک چاه‌های اکتشافی در آبخوان امکان تهیه‌ی مدل مفهومی چندلایه از آبخوان بر اساس لوگ حفاری این چاه‌ها وجود نداشت. بنابراین آبخوان روانسر-سنجایی در مطالعه حاضر به شکل تک لایه در نظر گرفته شده است.

۳- روش‌ها

۳-۱- مدل‌سازی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل

روش کار مورد استفاده در این مطالعه استفاده از مدل‌سازی عددی آبخوان آبرفتی می‌باشد. بدین منظور ابتدا با استفاده از داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده مدل مفهومی منطقه مورد مطالعه ساخته شد. جهت شبیه‌سازی آبخوان دشت روانسر-سنجایی از مدل عددی MODFLOW (Harbaugh et al., 2000) استفاده شده است. مدل مذکور قابلیت شبیه‌سازی جریان در شرایط پایدار و ناپایدار را داشته و دارای گزینه‌های مختلفی جهت انتخاب شرایط مرزی و ورود داده‌های مورد نیاز است. توانایی شبیه‌سازی مؤلفه‌های آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک توسط مدل مذکور توسط

Table 1- Monthly values of water resources and demand during 2007-2008

جدول ۱- مقادیر ماهانه منابع و مصارف سال آبی ۸۷-۱۳۸۶

Month	Outflow (MCM)			Inflow (MCM)			Average groundwater level (m)
	Agricultural demand	Domestic consumption	Subsurface flow	Return flow	Rainfall	Surface and subsurface Flow	
October	0.95	0.22	0.02	0.32	0.09	9.86	1316.92
November	0.90	0.19	0.02	0.29	0.09	8.07	1319.56
December	0.56	0.12	0.01	0.18	1.17	7.99	1319.43
January	0.00	0.11	0.00	0.07	0.23	7.82	1318.33
February	0.00	0.14	0.00	0.08	1.25	7.23	1318.44
March	0.00	0.18	0.80	0.11	1.04	7.43	1318.73
April	4.34	0.22	2.04	1.00	0.07	7.00	1319.27
May	16.48	0.29	1.76	3.47	0.22	5.93	1319.69
June	20.18	0.34	0.57	4.24	0.01	5.24	1319.32
July	17.25	0.36	0.09	3.67	0.00	4.36	1318.5
August	17.81	0.31	0.09	3.75	0.00	3.16	1317.61
September	18.50	0.27	0.06	3.86	0.15	2.97	1316.87
Total	96.96	2.76	5.45	21.04	4.32	77.04	-

دوره‌ی آماری ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۴ در نظر گرفته شد و شاخص بارش استاندارد شده محاسبه شد. سپس بمنظور بررسی اثر سناریوها، ابتدا نقشه تراز سطح ایستابی مهر ۱۳۹۴ از نقشه مشابه در مهر ۱۳۸۶ کسر گردید تا نقشه مقدار افت در بخش‌های مختلف آبخوان در طی دوره افت شدید آن حاصل گردد و نقشه افت حاصله به چهار پهنه تفکیک گردید (شکل ۳). در پهنه یک مقدار بهره‌برداری سالانه معادل ۲۵/۲۵ میلیون متر مکعب بوده که نرخ افت در این پهنه بین صفر تا پنج متر متغیر بوده است. در پهنه دو، مقدار بهره‌برداری معادل ۲۷/۴۱ میلیون متر مکعب در سال بوده و نرخ افت بین پنج تا ۱۰ متر بوده است. در پهنه سه، نرخ افت بین ۱۰ تا ۲۰ متر بوده و مقدار بهره‌برداری سالانه ۱۹/۵۲ مترمکعب در سال بوده است. در نهایت در پهنه چهارم، مقدار افت بین ۲۰ تا ۴۵ متر بوده و بهره‌برداری سالانه ۲۷/۵۴ مترمکعب بوده است. قابل ذکر است که نرخ افت در هر پهنه مربوط به کل دوره‌ی شبیه‌سازی شده (هشت سال) بوده است. بر اساس نقشه پهنه‌بندی افت در سطح آبخوان، چهار سناریوی اصلی (برخی با چند حالت مختلف) تعریف گردید تا اثر تغییرات اقلیمی و کاهش نرخ برداشت بر افت تراز سطح آب زیرزمینی و روند افزایشی آن بررسی گردد.

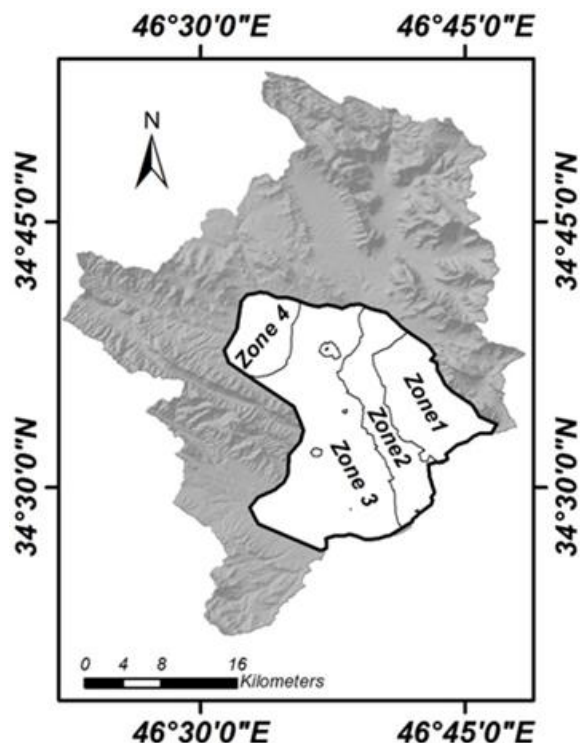


Fig. 3- Drawdown zoning map of Ravansar-Sanjabi aquifer (2007-2015)

شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی افت تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان روانسر-سنجابی (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۴)

بنابراین ماه خرداد که مقدار بارندگی در این دوره تقریباً صفر و مقدار سطح آب در رودخانه‌ها طی این ماه نیز ناچیز بوده است جهت واسنجی شرایط پایدار انتخاب گردید. به منظور واسنجی مدل ابتدا از روش سعی و خطا و سپس از روش خودکار در دامنه خطای قابل قبول ± 1 متر استفاده شد. جهت واسنجی مدل در شرایط ناپایدار، از آمار منابع و مصارف آب ماهانه دوره یک ساله سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ استفاده شد و مدل برای یک سال اجرا و واسنجی شد. سپس مدل واسنجی شده با آمار منابع و مصارف سال ۸۴-۱۳۸۳، برای شرایط ناپایدار اجرا و صحت‌سنجی گردید. در این مرحله ۱۲ دوره تنش و گام زمانی تعریف شد.

با توجه به در اختیار داشتن سطح آب پیژومترها در دوره‌ی افت شدید آبخوان (۹۴-۸۶) و نیز کنترل صحرایی تراز سطح آب در پیژومترها، علاوه بر واسنجی و ارزیابی، مدل طی دوره‌ی هشت ساله فوق نیز بر اساس منابع و مصارف آب مطابق با دوره‌ی ۸۷-۸۶، با تعریف ۹۶ گام زمانی اجرا و سطح تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شد. کیفیت واسنجی و صحت‌سنجی مدل به‌وسیله خطاهای آماری اندازه‌گیری شده است و سه معیار بدین منظور استفاده شد: میانگین خطا (ME)، میانگین مطلق خطا (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) است.

۳-۲- تعریف سناریو

پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، بمنظور بررسی اثرات اقلیمی بر وضعیت آبخوان و همچنین جهت تصمیم‌گیری در مدیریت برداشت از آبخوان و جلوگیری از افت بیشتر آن، چند سناریو در مدل لحاظ گردیده و نتایج تا سال ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفته است. بمنظور بررسی اثرات اقلیمی از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) استفاده شد. شاخص بارش استاندارد شده، کسری بارش را برای مقیاس‌های زمانی چندگانه (۴۸، ۲۴، ۱۲، ۶ و ۳ ماهه) محاسبه می‌کند. این مقیاس‌های زمانی تأثیر خشکسالی را بر منابع آبی متفاوت منعکس می‌کند. چون بارش برای مقیاس‌های زمانی کمتر از ۱۲ ماه نرمال پراکنده نمی‌شود، یک سازگاری و روشی ایجاد می‌شود که به شاخص بارش استاندارد شده اجازه می‌دهد که به صورت نرمال توزیع شود. یک واقعه خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که شاخص بارش استاندارد شده به صورت منفی تداوم یافته و شاخص بارش استاندارد به ۱- یا کمتر از آن برسد، واقعه‌ی خشکسالی هنگامی که شاخص بارش استاندارد شده مثبت شود خاتمه می‌یابد. بزرگی تجمعی خشکسالی هم ممکن است اندازه‌گیری شود. برای وقایع ترسالی، شاخص بارش استاندارد به ۱ یا بیشتر از آن می‌رسد. در مطالعه حاضر مقیاس زمانی ۱۲ ماه در طول

شاخصی بنام شاخص بازیافت^۳ (RI) تعریف شد. شاخص بازیافت شاخصی بی‌بعد بوده که هدف از آن تعیین حالت بهینه‌ترین بازگشت نرخ افت در مقابل کمترین کاهش نرخ بهره‌برداری از آبخوان است. بنابراین، سناریوی با مقدار RI کوچکتر حالت بهینه‌تر می‌باشد. بدین‌منظور مقدار کاهش بهره‌برداری به مقدار متوسط کاهش ذخیره سالانه در دوره شبیه‌سازی شده تقسیم شد. همچنین مقادیر افت حاصل از اجرای هر سناریو به افت کل در طول دوره شبیه‌سازی تقسیم تا بی‌بعد گردد. سپس مقادیر بی‌بعد کاهش بهره‌برداری بر مقادیر بی‌بعد افت در هر حالت تقسیم تا RI حاصل شود (جدول ۲).

۴- بحث و نتایج

۴-۱- واسنجی و ارزیابی مدل

پس از واسنجی مدل به روش دستی و کاهش خطای مدل، از مقادیر بدست آمده جهت مقادیر اولیه برای واسنجی خودکار (PEST) استفاده شد و مقدار خطای مدل به حداقل کاهش داده شده است. پارامترهای واسنجی شده در این مرحله شامل توزیع و بزرگی هدایت هیدرولیکی (K) و آبدهی ویژه (S_y) مدل بوده است.

در سناریوی اول شرایط کنونی آبخوان با فرض برداشت معادل نرخ کنونی و اینکه شرایط هیدرولوژیکی در طول مهر ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۹۴ در طول دوره مهر ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۴۰۲ تکرار گردد، شبیه‌سازی گردید (شکل ۴-ا).

در سناریوی دوم و سوم نرخ بهره‌برداری مشابه سناریوی اول، ولی شرایط هیدرولوژیکی متفاوت در نظر گرفته شد (شکل ۴-ب و ۴-ج). بدین‌منظور با استفاده از شاخص SPI خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها طی دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۴ تعیین و به ترتیب دوره‌های خشک و تر در سناریوهای دوم و سوم اعمال شد. هدف از اعمال این دو سناریو بررسی اثر نوسانات اقلیمی (دوره‌های خشک و یا تر) بر تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشد.

در سناریوی چهارم چندین حالت از ترکیب‌های مختلف کاهش نرخ بهره‌برداری با ادامه روند کنونی شرایط اقلیمی تعریف تا بهترین حالت تأثیر کاهش نرخ بهره‌برداری بر توزیع مکانی جبران افت در پهنه‌های مختلف بدست آید. در این سناریو مقدار نرخ پمپاژ در هر پهنه در چند مرحله کاهش و با مقدار بازگشت افت (احیا) مقایسه شد. بدین‌منظور

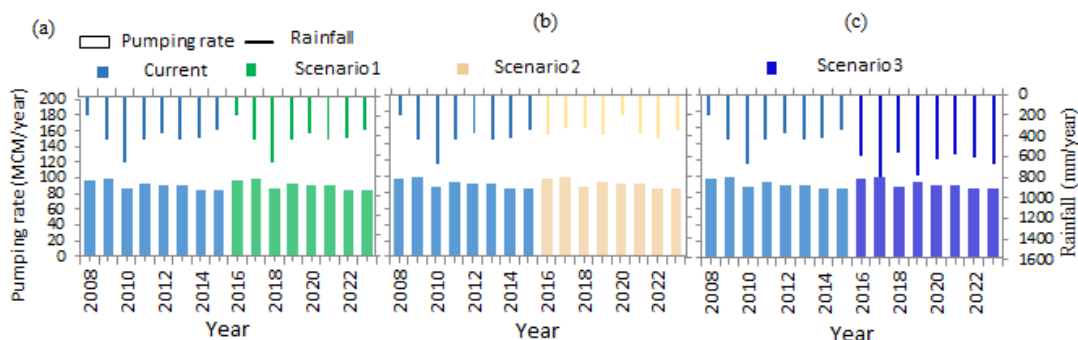


Fig. 4- The assumed hydrological index (precipitation) and pumping rate in scenario 1 (a), 2 (b) and 3 (c)
شکل ۴- فرضیات شاخص هیدرولوژیکی (بارندگی) و نرخ پمپاژ در سناریوهای ۱ (a)، ۲ (b) و ۳ (c)

Table 2- Drawdown recovery resulted by decreased withdrawal rates for several states and related recovery index (RI)

جدول ۲- بازیافت افت با کاهش نرخ بهره‌برداری از پهنه‌های مختلف برای حالت‌های متفاوت و شاخص بازیافت مربوطه (RI)

State	Decreases in withdrawal rates (MCM/year) for each zone	Decrease in withdrawal (MCM/year)	Drawdown recovery (m)	RI (-)
4-1	Zone 1= zone 2=zone 3=zone 4= -10%	8.6	3.12	0.580
4-2	Zone 1= zone 2=zone 3=zone 4= -20%	17.2	5.79	0.625
4-3	Zone 1= zone 2=zone 3=zone 4= -30%	25.8	8.22	0.661
4-4	Zone 1=-10%, zone 2=zone 3=zone 4= -20%	15.16	5.63	0.567
4-5	Zone 1=-10%, zone 2=-20%, zone 3=zone 4= -30%	19.7	7.19	0.577
4-6	Zone 1=-10%, zone 2=-20%, zone 3= -30%, zone 4= -50%	24.77	8.98	0.581
4-7	Zone 1=-20%, zone 2=-20%, zone 3= -30%, zone 4= -50%	26.8	9.27	0.609
4-8	Zone 1=-20%, zone 2=-20%, zone 3= -50%, zone 4= -50%	30.7	10.64	0.607
4-9	Zone 1=-20%, zone 2=-30%, zone 3= -50%, zone 4= -50%	32.8	11.16	0.619
4-10	Zone 1=-20%, zone 2=-20%, zone 3= -50%, zone 4= -70%	37.8	12.8	0.622

خلاصه خطاهای آماری در انتهای دوره واسنجی در شرایط پایدار و ناپایدار در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، شکل ۵ نتایج واسنجی مدل را بر اساس مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در طول دوره‌ی هشت ساله نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ در اکثر پیرومترهای آبخوان انطباق مناسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود دارد و مدل توانایی پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی را در آبخوان و در دراز مدت داشته است. نتایج حاصل شده در بالا زمانی حاصل گردید که منطقه مورد مطالعه به چند پهنه با هدایت هیدرولیکی متغیر بین ۰/۱ تا ۱۲۰ متر در روز و آبدی ویژه بین ۰/۱ تا ۰/۲۸ تقسیم گردید (شکل ۶-ا و ۶-ب). پس از بهینه‌سازی پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه، مدل مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. از این رو مدل برای یک دوره مجزا با آمار منابع و مصارف مجزا (۸۴-۱۳۸۳) اجرا شد. نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل بصورت مقایسه سطح آب محاسبه‌ای در مقابل مشاهده‌ای برای چهار ماه مهر، دی، فروردین و تیر سال آبی (۸۴-۱۳۸۳) ارائه شده است (شکل ۷). نتایج حاصل از ارزیابی مدل در این مرحله نشان داد که مقادیر پارامترهای واسنجی شده، نتیجه قابل قبولی را در این دوره نیز ارائه داده است.

۴-۲- تحلیل نتایج شاخص بارش استاندارد (SPI) و بیلان آب زیرزمینی

تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص SPI، در طول سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۴ نشان می‌دهد که چهار سال تر، ۱۲ سال نرمال و ۷ سال خشک طی این مدت وجود داشته است که بر افت سطح آب زیرزمینی تأثیرگذار بوده است. از بررسی هیدروگراف واحد آبخوان در طول این دوره و مقایسه با تحلیل خشکسالی منطقه (شکل ۸)، افت سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۷۹ بعد از سه سال خشک شروع شده و در طی سال‌های ۸۴-۱۳۸۱ تقریباً افتی وجود نداشته و شرایط آبخوان پایدار بوده است. افت شدید سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۵ با افزایش اضافه برداشت از آبخوان جهت مصارف کشاورزی شروع شده است. با توجه به شکل ۸ نرخ افت از این سال به بعد ۱/۳۳ میلی‌متر بر سال بوده است.

همچنین تحلیل بیلان آب زیرزمینی جهت ارائه تصویر بهتری از تغییرات مؤلفه‌های بیلان در شرایط متفاوت ارائه شده است. شکل ۹ مؤلفه‌های بیلان شبیه‌سازی شده در طول دوره‌ی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۴ را نشان می‌دهد. مطابق با شکل مذکور، تغییرات در مقدار خالص جریان (ورودی - خروجی) سالانه در مرزهای ورودی و خروجی آب زیرزمینی^۴ انطباق زیادی با تغییرات بارندگی داشته است. بدین‌صورت که در سال‌های تر مقدار خالص جریان در مرزها افزایش یافته و در سال‌های خشک بتدریج کاهش یافته است. این انطباق بخوبی نشانگر نفوذ بارندگی در ارتفاعات و سازندهای کارستی منطقه و در نهایت تغذیه از مرزهای آبخوان است. مقدار متوسط خالص جریان مرزی (inflow-outflow) سالانه حدود ۴۴ میلیون مترمکعب محاسبه شده است. مقدار ذخیره خالص سالانه دارای روند کاهشی مشابه با جریان مرزی بوده است. این موضوع می‌تواند بدان معنی باشد که یکی از مؤلفه‌های کنترل‌کننده‌ی تغییرات ذخیره‌ی آبخوان مقدار جریان ورودی یا خروجی از مرزهای آبخوان است. همچنین مقدار ذخیره در طول سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ بیشترین مقدار بوده است که مقدار بارندگی افزایش چشمگیری در این سال داشته است. مقدار خالص ذخیره‌ی تجمعی آبخوان حدود ۲۲۲ میلیون متر مکعب در طول دوره شبیه‌سازی بوده که مقدار متوسط آن سالانه ۳۸ میلیون متر مکعب محاسبه شده است. رودخانه‌ها و شبکه‌ی آبراهه‌های منطقه در بیشتر بخش‌های مرکزی و خروجی آبخوان به عنوان زهکش عمل کرده‌اند (این نتایج با مشاهدات صحرایی تأیید شده است). مقدار خالص زهکشی از آبخوان توسط این مؤلفه‌ها بطور متوسط سالانه حدود ۶/۵ میلیون متر مکعب بوده است.

۴-۳- تحلیل نتایج سناریوها

همانطور که اشاره شد، چهار سناریو با فرضیات متفاوت شرایط اقلیمی برای سناریوهای یک، دو و سه و کاهش نرخ بهره‌برداری برای سناریوی چهار در مدل لحاظ گردید. در سناریوی یک فرض گردید که شرایط اقلیمی موجود در دوره‌ی شبیه‌سازی، برای هشت سال آینده نیز تکرار گردد و بهره‌برداری از آبخوان با همان روند دوره‌ی شبیه‌سازی صورت گیرد.

Table 3- Statistical errors on performance of model during calibration and verification stages

جدول ۳- مقادیر خطاهای آماری اجرای مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی			
Step	Mean Error	Mean Abs. Error	Root Mean Sq. Error
Steady	-0.39	0.45	0.97
Transient	0.064	1.35	2.85
Verification	-0.02	0.62	1.05

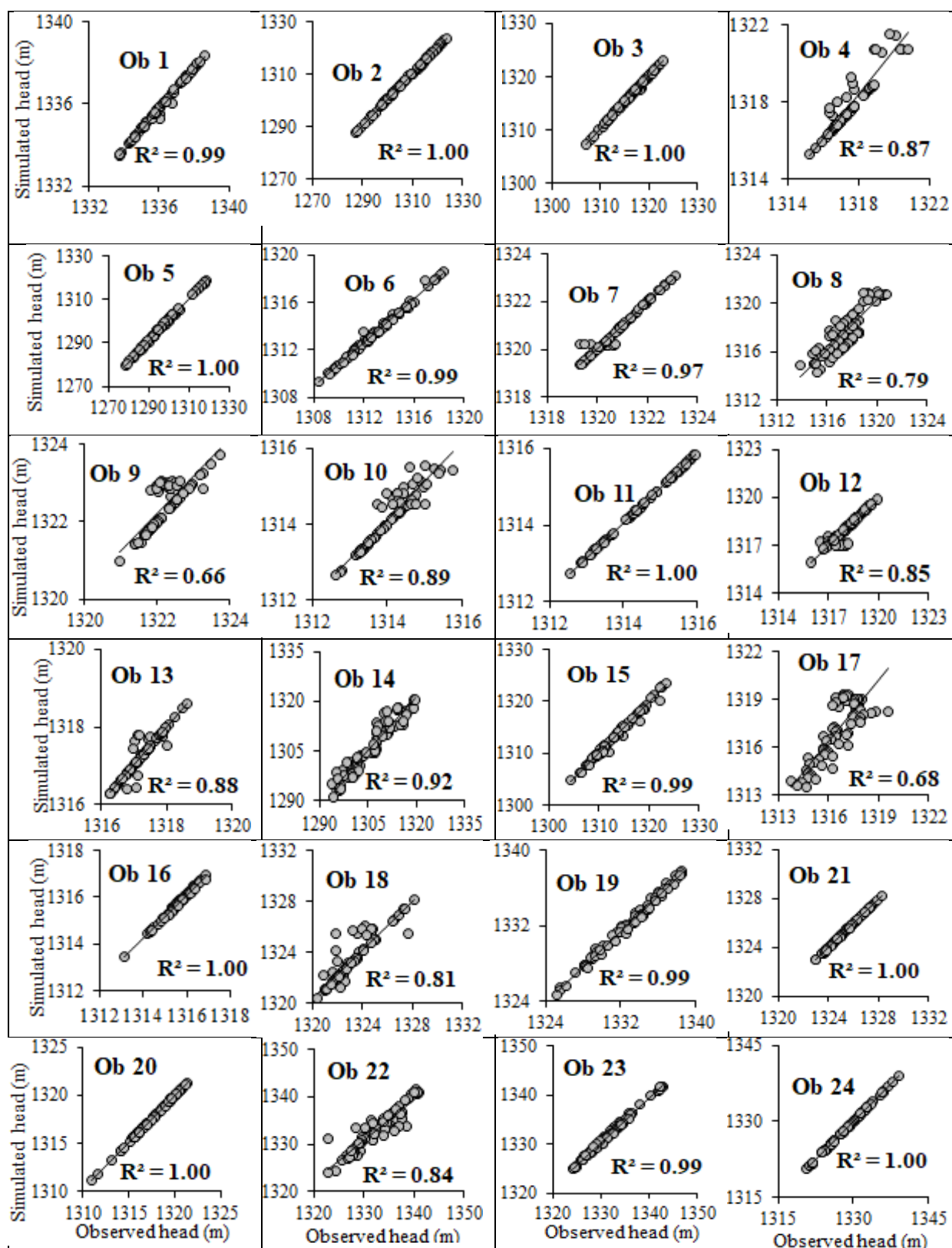


Fig. 5- Simulated head against observed head

شکل ۵- بارهیدرولیکی شبیه‌سازی شده در مقابل بار هیدرولیکی مشاهده شده

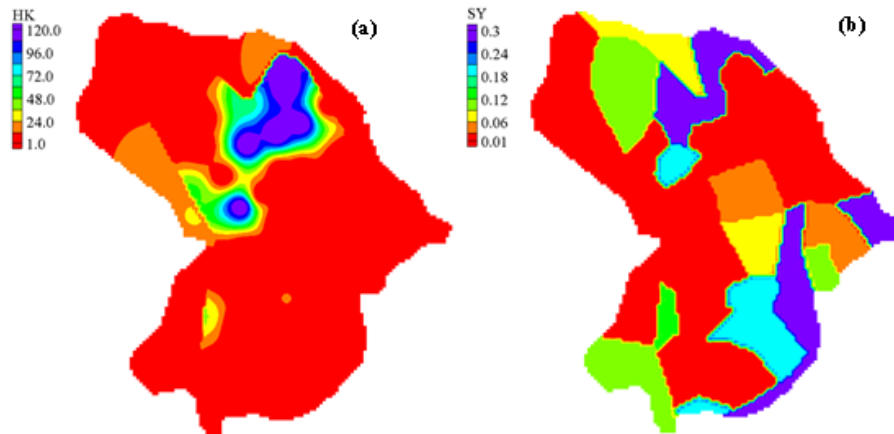


Fig. 6- Calibrated parameters over Ravasar-Sanjabi aquifer, a: hydraulic conductivity ($m d^{-1}$) and b: specific yield

شکل ۶- توزیع پارامترهای واسنجی شده در آبخوان روانسر- سنجابی، a: هدایت هیدرولیکی (متر در روز) و b: آبدهی ویژه

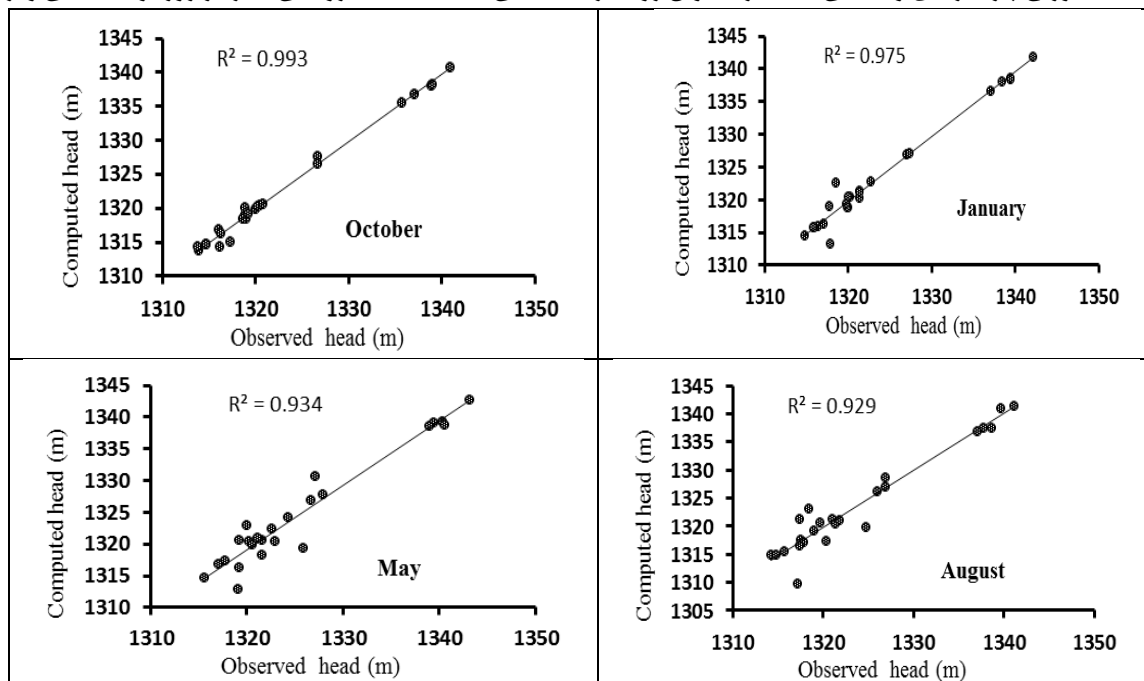


Fig. 7- Simulated and observed groundwater level for verification stage during 2004-2005

شکل ۷- تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در مرحله صحت‌سنجی سال آبی ۸۴-۱۳۸۳

و تر، $1/4$ متر افت بیشتری حاصل شده است. اعمال سناریوی سوم با روند بهره‌برداری مشابه دوره‌ی شبیه‌سازی و انتخاب سال‌های تر به عنوان شاخص هیدرولوژیکی، نشان داد که سطح آب زیرزمینی در پایان دوره $5/2$ متر افت خواهد داشت. با مقایسه نتایج سه سناریو می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات اقلیمی، که با شاخص هیدرولوژیکی بارندگی در مدل لحاظ شده است بخشی از افت سطح آب زیرزمینی را حاصل گردیده است. اما نمی‌توان این عامل را به عنوان فاکتور اصلی افت سطح آب زیرزمینی در منطقه دانست.

نتایج حاصل از اعمال سناریوی یک نشان داد که تراز سطح آب زیرزمینی با ادامه روند کنونی بهره‌برداری همچنان روند افزایشی افت خود را حفظ خواهد نمود (شکل ۱۰). به‌طوریکه تراز سطح آب زیرزمینی به میزان حدود 90 سانتی‌متر در سال افت خواهد داشت. به عبارت دیگر عمق سطح آب زیرزمینی هفت متر در پایان دوره هشت ساله افزایش می‌یابد. در سناریوی دوم که با لحاظ نرخ بهره‌برداری دوره‌ی شبیه‌سازی و شرایط اقلیمی سال‌های خشک موجود در آمار بلند مدت اجرا گردید، نتایج نشان داد که سطح آب زیرزمینی $8/4$ متر افت خواهد داشت. در مقایسه با سناریوی یک با توالی سال‌های خشک

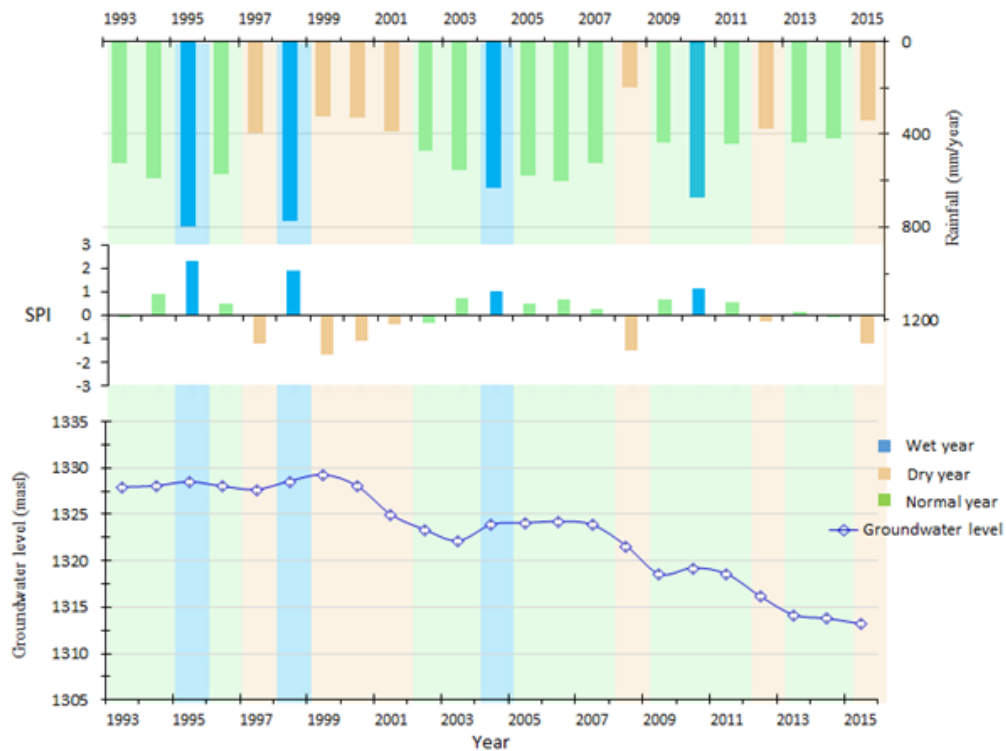


Fig. 8- Annual average values of groundwater levels, annual precipitation and standardized precipitation index (SPI)

شکل ۸- مقادیر متوسط سالانه سطح آب زیرزمینی (هیدروگراف واحد آبخوان)، بارندگی سالانه و شاخص خشکسالی (SPI)

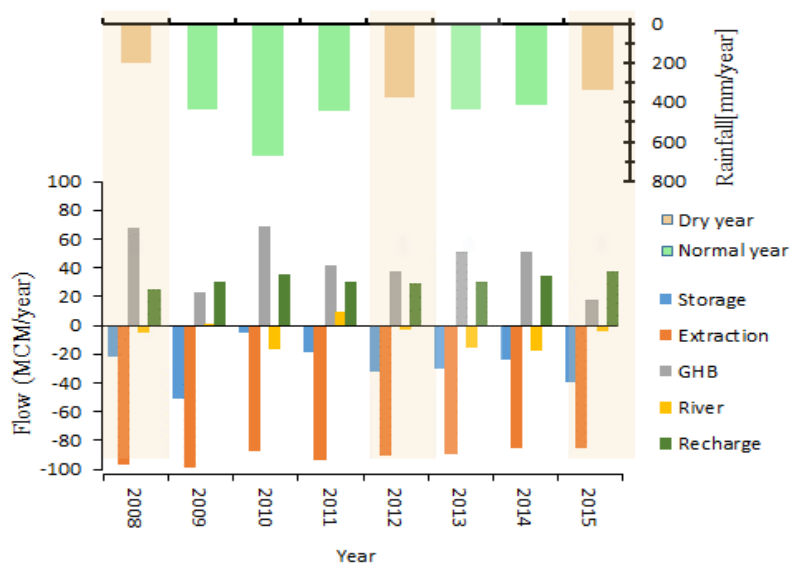


Fig. 9- Water budget components and hydrological conditions during the simulation period

شکل ۹- مؤلفه‌های بیلان و شرایط هیدرولوژیکی در طول دوره‌ی شبیه‌سازی شده

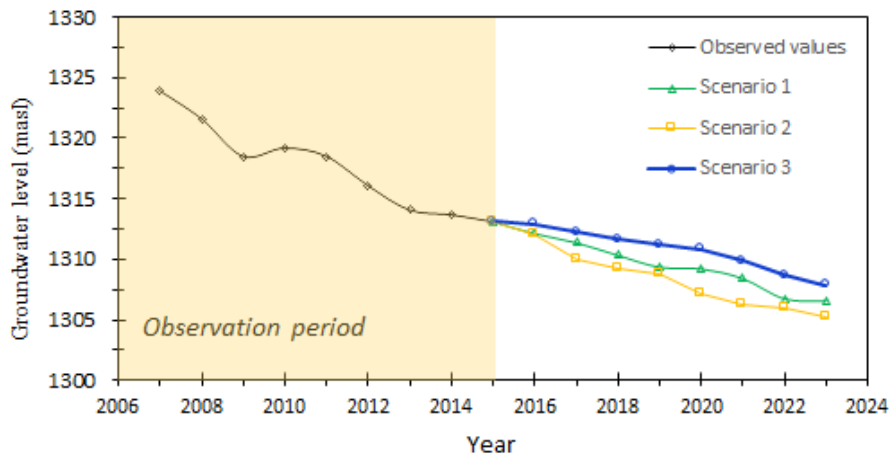


Fig. 10- Average yearly water table variation resulted by scenarios 1, 2 and 3
 شکل ۱۰- تغییرات سالانه هیدروگراف واحد آبخوان حاصل از اعمال سناریوهای یک، دو و سه

توجه به شکل مذکور، اعمال حالت‌های چهارم و پنجم توانسته افت بیشتر آبخوان را متوقف نموده و شرایط نسبتاً پایداری را حاکم نماید. بنابراین، حالت‌های حالت‌های چهارم و پنجم (۴-۴ و ۴-۵)، علاوه بر بیشینه بازیافت افت در مقابل کمترین کاهش نرخ بهره‌برداری، از افت بیشتر در آبخوان نیز جلوگیری می‌نمایند. با توجه به شکل ۱۱ اگرچه برخی حالت‌ها، همانند ۴-۸، ۴-۹، ۴-۱۰ و ۴-۱۰ توانسته‌اند روند افزایشی را در تراز سطح آبخوان ایجاد و یا به نوعی احیای افت در آبخوان را تسریع بخشند، اما چنین حالاتی که نیاز به کاهش چشمگیر نرخ بهره‌برداری از آبخوان را دارند، به دلایل مشکلات اجرایی و اجتماعی بیشتر نمی‌توانند حالت بهینه باشند.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی سناریوهای مدیریتی مختلف جهت متوقف‌سازی افت در آبخوان‌هایی که با روند شدید افت سطح آب زیرزمینی مواجه هستند انجام شد. بنابراین آبخوان روانسر-سنجایی در استان کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی هیدروگراف واحد آبخوان در طی دوره‌ی زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۴ نشان داد که تراز سطح آب زیرزمینی حدود ۱۵ متر افت داشته است که از این مقدار، ۴ متر مربوط به ۱۶ سال اول دوره و ۱۱ متر مربوط به ۸ سال آخر دوره مذکور بوده است. از مدل MODFLOW جهت شبیه‌سازی آبخوان استفاده و مدل برای دوره‌ی با بیشترین افت (۸ سال) اجرا و واسنجی گردید. نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که انطباق مناسبی بین سطح آب شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده حاصل گردید و خطاهای آماری در شرایط ناپایدار شامل میانگین خطا (۰/۰۶۴)، میانگین مطلق خطا (۱/۳۵) و مجذور میانگین مربعات خطا (۲/۸۵) در پایان دوره‌ی شبیه‌سازی بوده است.

مطابق با نرخ افت در هر پهنه، سناریوی چهارم در راستای حصول نرخ بهره‌برداری بهینه از هر پهنه اعمال شد. در این سناریو مقدار نرخ بهره‌برداری مرحله به مرحله کاهش داده شد و مقدار بازگشت افت (احیا) در هر مرحله مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). بدین منظور ۱۰ حالت مختلف با کاهش نرخ بهره‌برداری متفاوت از هر پهنه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که از میان حالت‌های مختلف، حالت چهارم و پنجم در جدول ۲، (یعنی ۴-۴ و ۴-۵) کمترین شاخص بازیافت (RI) را داشته است. حالت سوم (۳-۴) با کاهش سالانه ۲۵/۸ میلیون متر مکعب (مجموع تمام پهنه‌ها) دارای کمترین مقدار بازگشت افت یا بزرگترین شاخص بازیافت (RI=0.661) بوده است. این در حالی است که مقدار کاهش بهره‌برداری در این حالت بیشتر از حالت‌های چهارم و پنجم بوده است اما بازگشت افت کمتری داشته است. این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که جهت کاهش بهره‌برداری از آبخوان‌های تحت افت شدید، بهتر است که افت در آبخوان پهنه‌بندی شده و سپس نرخ بهره‌برداری در مناطق دارای افت بیشتر، کاهش بیشتری نسبت به سایر مناطق داشته باشد. به عبارت دیگر با کاهش یکسان بهره‌برداری از سطح آبخوان ممکن است نتیجه معنی‌داری در بازیافت افت آبخوان نداشته باشد. در حالت دهم بیشترین بازیافت افت (۱۲/۸ متر) با بیشترین کاهش در نرخ بهره‌برداری از پهنه‌ها (۳۷/۸ میلیون متر مکعب در سال) حاصل گردیده است اما شاخص بازیافت در این حالت نشان می‌دهد که بازیافت افت مناسبی در نتیجه چنین کاهش برداشتی از آبخوان حاصل نشده است. لذا این حالت نمی‌تواند بهینه در نظر گرفته شود. همانطور که ذکر شد حالت بهینه، حالتی است که بیشترین بازیافت افت به ازای کمترین کاهش نرخ بهره‌برداری را حاصل نماید و از طرف دیگر از افت بیشتر در آبخوان نیز جلوگیری نماید. مقدار تغییرات سطح آب زیرزمینی (هیدروگراف واحد) با اعمال حالت‌های مختلف این سناریو ترسیم و در شکل ۱۱ ارائه شده است. با

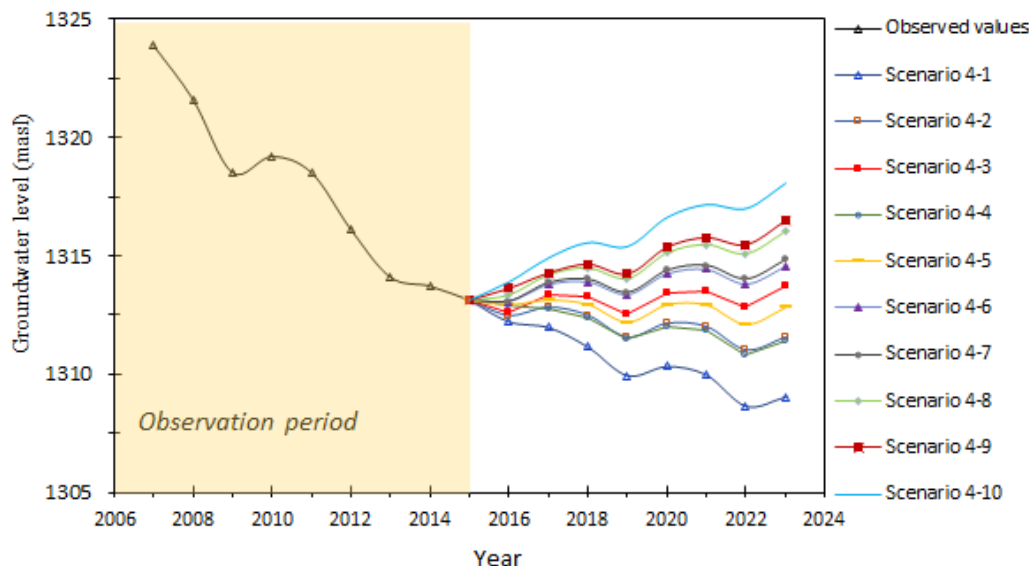


Fig. 11- Annual average water table variation resulted by different states of scenario 4

شکل ۱۱- تغییرات متوسط سالانه سطح آب زیرزمینی (هیدروگراف واحد) حاصل از اعمال حالت‌های مختلف سناریوی چهار

کاهش بهره‌برداری از آبخوان‌های تحت افت شدید، بهتر است که افت در آبخوان پهنه‌بندی شده و سپس در مناطق دارای افت بیشتر، نرخ بهره‌برداری کاهش بیشتری نسبت به سایر مناطق داشته باشد.

۶- تقدیر و تشکر

مطالعه حاضر تحت حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای استان کرمانشاه و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام پذیرفته است. لذا نویسندگان قدردان حمایت‌های مالی و تدارکاتی شرکت‌های فوق‌الذکر می‌باشند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Arlington
- 2- Preconditioned Conjugate-Gradient
- 3- Recovery Index
- 4- GHB

۶- مراجع

- Abboa H, Gev I (2008) Numerical model as a predictive analysis tool for rehabilitation and conservation of the Israeli coastal aquifer: Example of the SHAFDAN sewage reclamation project. Desalination 226:47-55
- Akram F, Rasul MG, Khan MMK, Amir MSII (2012) A comparative view of groundwater flow simulation using two modeling software-MODFLOW and MIKE SHE, 18th Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston, Australia, 3-7 December

بر این اساس مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل در بخش‌های مختلف بین ۰/۱ تا ۱۲۰ متر در روز برای هدایت هیدرولیکی و بین ۰/۰۱ تا ۰/۲۸ برای آبدی ویژه متغیر بوده است. همچنین مقدار ضریب همبستگی مقادیر بار هیدرولیکی مشاهده‌شده و اندازه‌گیری شده در مرحله‌ی صحت‌سنجی بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ متغیر بوده است. از مدل واسنجی‌شده جهت بررسی نتایج اعمال سناریوهای مختلف برای دوره‌ی زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ استفاده گردید. در سناریوی اول شرایط کنونی آبخوان با فرض تکرار شرایط هیدرولوژیکی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۴ اعمال و نتایج نشان داد که با ادامه‌ی این روند سالانه سطح آب زیرزمینی حدود ۹۰ سانتی‌متر افت خواهد نمود و عمق آب در پایان این دوره ۷ متر کاهش پیدا خواهد کرد. نتایج اعمال سناریوی دوم با فرض تکرار سال‌های خشک نشان داد که افت سطح آب زیرزمینی به ۸/۴ متر خواهد رسید. اعمال سناریوی سوم با فرض تکرار سال‌های تر منتج به افت ۵/۲ متری سطح آب در پایان دوره شد. مقایسه این سه سناریو نشان داد که عامل تغییرات اقلیمی در افت آبخوان دخالت داشته است اما فاکتور اصلی افت شدید آبخوان نبوده است. از این‌رو سناریوی چهارم با هدف کاهش نرخ بهره‌برداری در پهنه‌های مختلف و در چند حالت متفاوت اعمال و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اعمال این سناریو نشان داد که در حالت کاهش ۱۰ درصدی بهره‌برداری از پهنه یک و کاهش ۲۰ درصدی از سایر پهنه‌ها بهترین نتیجه را از نظر بازیافت افت در مقابل نرخ کاهش پمپاژ داشته است. همچنین، نتایج نشان داد که حالتی که بیشترین کاهش نرخ بهره‌برداری اعمال شده (۳۷/۸ میلیون متر مکعب در سال)، اما مقدار بازیافت افت بهینه نبوده است. نتایج این مطالعه نشان داد که جهت

- water management model to manage groundwater utilization (Case study in Shahr-e-kord plain aquifer, Iran) development of a graphical interface for ground water management model to manage groundwater utilization (Case study in Shahr-e-kord plain aquifer, Iran). *Iran-Water Resources Research* 9(3):47-58
- Ketabchi H, Nik-Khah R, Morid S (2018) Numerical simulation of Namdan aquifer in the Fars province of Iran: Assessment of green water management impacts on the aquifer restoration. *Iran-Water Resources Research* 14(2):128-141
- Kourgialas NN, Dokou Z, Karatzas GP, Panagopoulos G, Soupios P, Vafidis A, Manoutsoglou E, Schafmeister M (2015) Saltwater intrusion in an irrigated agricultural area: Combining density-dependent modeling and geophysical methods. *Environmental Earth Sciences* 75:15, <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4856-y>
- Mahmoudi N, Nakhaei M, Porhemmat J (2017) Assessment of hydrogeochemistry and contamination of Varamin deep aquifer, Tehran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences* 76:370
- Manghi F, Williams D, Safely J, Hamidi MR (2012) Groundwater flow modeling of the Arlington Basin to evaluate management strategies for expansion of the Arlington Desalter water production. *Water Resources Management* 26:21-24
- Martínez-Santos P, Pedretti D, Martínez-Alfaro PE, Conde M, Casado M (2010) Modelling the effects of groundwater-based urban supply in low-permeability aquifers: Application to the Madrid aquifer, Spain. *Water Resources Management* 24:4613-4638
- Mohammadzadeh H, Dadgar MA, Nassery H (2017) Prediction of the effect of water supplying from Shirindare dam on the Bojnourd aquifer using MODFLOW2000. *Water Resources Management* 44:216-225
- Mori K, Tada K, Nishioka T (2009) Large-scale and high-performance groundwater flow modeling and simulation for water resource management in the Yellow River basin, China. *Bulletin of the Geological Survey of Japan* 60:131-146
- Praveena SM, Aris AZ (2010) Groundwater resources assessment using numerical model: A case study in low-lying coastal area. *International Journal of Environmental Science and Technology* 7:135-146
- Shahoei Porhemmat J, Sedghi Hosseini M, Saremi M (2017) Daily runoff simulation in Ravansar Sanjabi basin, Kermanshah, Iran, using remote sensing through SRM model and comparison to SWAT
- Allen DM, Mackie DC, Wei M (2004) Groundwater and climate change: A sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, Southern British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal* 12:270-290
- Andreas H, Matías M, Bartolomé A, Ana M, Thorsten W, Jens L (2014) Modeling spatiotemporal impacts of hydroclimatic extremes on groundwater recharge at a Mediterranean karst aquifer. *Water Resources Research* 50:6507-6521
- Boughariou E, Allouche N, Jmal I, Mokadem N, Ayed B, Hajji S, Khanfir H, Bouri S (2018) Modeling aquifer behavior under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia. *Journal of African Earth Sciences* 141:118-129
- Candela L, Elorza FJ, Tamoh K, Jiménez-Martínez J, Aureli A (2014) Groundwater modelling with limited data sets: The Chari-Logone area (Lake Chad Basin, Chad). *Hydrological Processes* 28:3714-3727
- Duran-Encalada JA, Paucar-Caceres A, Bandala ER, Wright GH (2017) The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US-Mexican transborder region. *European Journal of Operational Research* 256:567-581
- Eghlim Tarh CEC (2008) Groundwater sources and sinks inventory in Ravansar-Sanjabi plain. Regional Water Company, Kermanshah province, 100p (In Persian)
- Feng S, Huo Z, Kang S, Tang Z, Wang F (2010) Groundwater simulation using a numerical model under different water resources management scenarios in an arid region of China. *Journal of Environmental Earth Science* 62:961-971
- Gad MI, Zeid SAM, Khalaf S, Abdel-Hamid AM, Seleem EM, Feki AEI (2015) Optimal management of groundwater resources in arid areas case study: North Sinai, Egypt. *International Journal of Water Resources and Arid Environments* 4:59-77
- Gleeson T, Alley WM, Allen DM, Sophocleous MA, Zhou Y, Taniguchi M (2012) Towards sustainable groundwater use: Setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. *Ground Water* 50:19-26
- Harbaugh AW, Banta ER, Hill MC, McDonald MG (2000) The U.S. Geological Survey's modular ground water flow model-User guide to modularization concepts and the ground water flow process. U.S. Geological Survey, United States
- Janatrostami S, Kholghi M, Mohammadi K (2014) Development of a graphical interface for ground

- Uddameri V, Kuchanur M (2007) Simulation-optimization approach to assess groundwater availability in Refugio County, TX. *Environmental Geology* 51:921-929
- Vazquez-Sune E, Abarca E, Carrera J, Capino B, Gamez D, Pool, M, Simo T, Batlle F, Ninerolab JM, Ibanez X (2006) Groundwater modeling as a tool for the European water framework directive (WFD) application: The Llobregat case. *Physics and Chemistry of the Earth* 31:1015-1029
- Xuesen M, Jinsheng J, Changming L, Zhimin H (2005) A simulation and prediction of agricultural irrigation on groundwater in well irrigation area of the piedmont of Mt. Taihang, North China. *Hydrological Processes* 19:2071-2084
- Zamikav Gostar C.C.E (2011) Vertical electrical sounding of Ravansar-Sanjabi plain. *Regional Water Copmony, Kermanshah Province, 200P* (In Persian)
- Zhang Y, Ma J, Chang X, van Wonderen J, Yan L, Han J (2012) Water resources assessment in the Minqin Basin: An arid inland river basin under intensive irrigation in northwest China. *Environmental Earth Sciences* 65:1831-1839
- model. *Applied Ecology and Environmental Research* 15(3):1843-1862
- Sherif M, Kacimov A, Javadi A, Ebraheem AA (2012) Modeling groundwater flow and seawater intrusion in the coastal aquifer of Wadi Ham, UAE. *Water Resources Management* 26:751-774
- Sidiropoulos P, Mylopoulos N, Loukas A (2012) Optimal management of an overexploited aquifer under climate change: The Lake Karla case. *Water Resources Management* 27:1635-1649
- Sidiropoulos P, Mylopoulos N, Loukas A (2015) Stochastic simulation and management of an over-exploited aquifer using an integrated modeling system. *Water Resources Management* 29:929-943
- Sophocleous M (2010) Review: Groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA—Lessons and recommended actions. *Hydrogeology Journal* 18:559-575
- Switzman H, Coulibaly P, Adeel Z (2015) Modeling the impacts of dry land agricultural reclamation on groundwater resources in Northern Egypt using sparse data. *Journal of Hydrology* 520:420-438