

بررسی آثار تغییر اقلیم تحت سناریوهای مختلف بر روی آب زیرزمینی دشت کرمان

فرشاد سلیمانی ساردو^{۱*}، طیبه مصباح‌زاده^۲، ناصر برومند^۳، علی اذره^۴، الهام رفیعی‌ساردویی^۵

۱. مربی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه جیرفت
۲. استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران tmesbah@ut.ac.ir
۳. دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان nbroomand@yahoo.com
۴. استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه جیرفت aliazareh@gmail.com
۵. استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه جیرفت ellrafiei@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۰

چکیده

پدیده تغییر اقلیم یکی از مهمترین چالش‌های زیست‌محیطی است که بر روی منابع پایه از جمله منابع آب زیرزمینی تأثیرات سویی دارد. با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش برای بررسی آثار تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی دشت کرمان از مدل اقلیمی LARS-WG و مدل آب زیرزمینی GMS استفاده شد. سناریوهای انتشار اقلیمی A2، A1B و B1 از مدل HADCM3 در دوره زمانی طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۴۱۰ بررسی شد و برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی با استفاده از نرم افزار GMS سطح آب زیرزمینی برای دوره ۱۳۹۱-۱۴۰۹ پیش‌بینی شد و اثر سناریوهای اقلیمی بر روی آن اعمال شد. برای مدل‌سازی آب زیرزمینی، مهر ۱۳۸۱ به‌عنوان حالت پایدار به مدل معرفی شد و مقادیر هدایت هیدرولیکی و تغذیه و شرایط مرزی برآورد شد. سپس مدل برای سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۲ برای شرایط ناپایدار اجرا شد و میزان سطح آب زیرزمینی برای سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۹ تحت سناریوهای مختلف اقلیمی پیش‌بینی شد. نتایج پژوهش نشان داد که متوسط افت آب زیرزمینی در هر چهار سناریو به‌ترتیب برای سناریوهای اقلیمی A2، A1B و B1 در سناریوی اول (۰/۸۶-، ۵/۸۵- و ۹/۱۹-)، سناریوی دوم (۹/۲۶-، ۹/۳۶- و ۹/۴۹-)، سناریوی سوم (۱۲/۰۹-، ۱۲/۲۱- و ۱۲/۲۸-) و سناریوی چهارم (۱۵/۴۳-، ۱۵/۵۵- و ۱۵/۵۸-) متر است. نتایج حاصله از آثار تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی در دوره آتی نشان دهنده این نکته مهم است که تحت سناریوهای مختلف اقلیمی با افت سطح آب زیرزمینی در دشت کرمان مواجه خواهیم بود که با مدیریت صحیح آبخوان و همچنین ارائه راهکارهای سازگار با تغییر اقلیم از افت سطح آب زیرزمینی در آینده کاسته شود.

کلیدواژه

افت آب زیرزمینی، تغییر اقلیم، سناریوهای اقلیمی، دشت کرمان.

مقدمه

اساسی با روند طبیعی این تغییرات دارد و به این پدیده، تغییر اقلیم می‌گویند (مصباح، ۲۰۰۶). تغییرات در دمای هوا و بارندگی اثر معناداری بر روی منابع آب و متغیرهای هیدرولوژیکی دارد. تغییر اقلیم و افزایش دما به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بر روی منابع آبی آثار

یکی از مهمترین آثار ناشی از صنعتی شدن در قرن اخیر، افزایش گازهای گلخانه‌ای است که سبب گرمتر شدن جو کره زمین می‌شود (Solomon, 2007). این افزایش سبب تأثیراتی بر وضعیت پارامترهای اقلیمی شده که تفاوت‌های

پیش‌بینی کند. در این راستا پژوهش‌های در سطح جهانی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های Noori و همکاران (۲۰۱۴)، Hassan و همکاران (۲۰۱۴)، Koch و همکاران (۲۰۱۳) و Etemadi و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد. از سوی دیگر به دلیل کاهش بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پمپاژ بیش از حد سفره‌های آب زیرزمینی امری رایج است. بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب به بهره‌برداری بیش از ظرفیت آبخوان‌ها می‌انجامد که این امر خسارات جبران‌ناپذیری را به منابع آبی وارد کرده است. بنابراین مدیریت آب‌های زیرزمینی باید به عنوان اصلی در برنامه‌ریزی‌های کشور قرار گیرد (پورطبری و ایل بیگی، ۱۳۹۲). از سوی دیگر کشور ما از لحاظ جغرافیایی در منطقه‌ای قرار گرفته که نه تنها به‌طور طبیعی و ذاتی بخش عمده آن جزو مناطق خشک و فراخشک محسوب می‌شود (حدود ۶۶ درصد) بلکه جزو کشورهایی است که ضریب تأثیرپذیری آن از تغییرات اقلیمی بالاتر از بسیاری مناطق دیگر کره زمین است (آذره، ۱۳۹۵). افزایش دما به همراه خود افزایش مصرف آب آبیاری، شرب و بهداشت و مصرف آب دام و طیور را نیز دامن می‌زند. پژوهشگران متعددی به مبحث مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی با مدل GSM پرداخته‌اند که از جمله می‌توان به Goure و همکاران (۲۰۱۱)، Jang و همکاران (۲۰۱۲) و Narula و Gosain (۲۰۱۴) اشاره کرد. از سویی به دلیل تغییر اقلیم یکی از مهمترین پارامترها در بحث تغذیه منابع آب زیرزمینی به شمار می‌رود. در بحث آثار تغییر اقلیم بر منابع آب یک سری پژوهش‌ها به انجام رسیده است که می‌توان به پژوهش‌های Ertürk و همکاران (2014)، Lemieux و همکاران (۲۰۱۵)، Shrestha و همکاران (۲۰۱۶)، Mani و همکاران (۲۰۱۶)، Herrmann و همکاران (۲۰۱۵) و Yoshioka و همکاران (۲۰۱۶)، اشاره کرد. جمع‌بندی پیشنهادی تحقیق نشان‌دهنده این نکته مهم است که انجام پژوهش در مورد آثار ناشی از تغییر

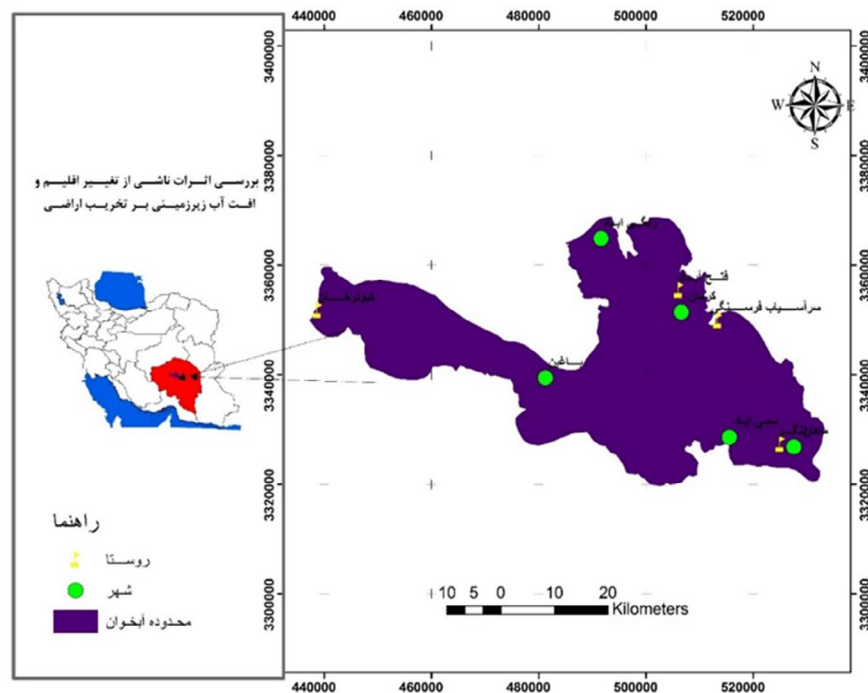
شدیدتری خواهد داشت (Samadi et al., 2009). این پدیده به آرامی در حال گسترش به سراسر کره زمین است و تأثیر آن در منابع مختلف از جمله منابع آب، کشاورزی و پارامترهای اقلیمی در مقیاس منطقه است و از مهمترین تبعات آن تأثیرگذاری در پدیده‌های حدی جوی و اقلیمی نظیر طوفان، سیل، تگرگ، خشکسالی و ... خواهد بود و انتظار می‌رود در دهه‌های آینده این پدیده‌ها روند افزایشی داشته باشد (باباییان و همکاران، ۱۳۸۸). غلظت CO₂ جو در صد سال گذشته از حدود ۲۸۰ به ۳۶۹ PPM و میانگین درجه حرارت جهانی حدود ۰/۶۹ درجه سانتیگراد افزایش داشته است. طبق پیش‌بینی‌ها، افزایش میانگین درجه حرارت جهانی در خوش‌بینانه‌ترین حالت در دوره زمانی ۱۹۹۰-۲۱۰۰ بین ۳/۴-۱ درجه سلسیوس و افزایش میانگین تراز آب بین ۹-۸۸ سانتی‌متر خواهد بود (Houghton et al., 2001). افزایش در آستانه‌های دمایی و کاهش بارندگی به خشکسالی‌های شدیدی در منطقه می‌انجامد که باعث کاهش میزان رطوبت جو، رطوبت سطحی خاک، منابع آب سطحی و آب زیرزمینی می‌شود. هوای گرم، گنجایش رطوبتی بالایی دارد و باعث افزایش تبخیر از سطح مرطوب می‌شود. افزایش تبخیر نیز کاهش رطوبت خاک، افزایش نیاز آبی گیاهان، افزایش نیاز آبی برای کشاورزی و در نهایت کاهش سطح آب‌های زیرزمینی را در پی دارد (خلق ذکراباد و همکاران، ۱۳۹۱). از سوی دیگر کشور ایران سرزمینی خشک و بیابانی با نزولات جوی بسیار کم بوده که میزان بارندگی در آن کمتر از یک‌سوم بارندگی در سطح دنیا است (علیزاده، ۱۳۸۵). بنابراین بررسی اثر تغییر اقلیم و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در دوره آتی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از معتبرترین ابزار برای بررسی آثار تغییر اقلیم استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی نظیر LARS-WG است که می‌تواند پارامترهای اقلیمی را در مقیاس محلی

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی محدوده مطالعاتی دشت کرمان واقع در استان کرمان بخشی از حوضه آبخیز مرکزی ایران است. این محدوده تقریباً در جنوب غرب دشت لوت واقع است. وسعت این دشت ۲۰۳۰ کیلومتر مربع است. دشت کرمان بین طول‌های جغرافیایی ۵۶ درجه و ۲۰ دقیقه و ۵۶ ثانیه الی ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه و ۵۰ ثانیه شرقی و عرض ۳۰ درجه و ۰ دقیقه و ۲۳ ثانیه تا ۳۰ درجه و ۲۷ دقیقه و ۵ ثانیه شمالی واقع است موقعیت دشت کرمان در شکل ۱ نشان داده شده است.

اقلیم بر منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک به دلیل داشتن اکوسیستمی شکننده اهمیت زیادی دارد. از سویی دیگر طبق پژوهش‌های وزارت نیرو، دشت کرمان به دلیل برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی در چند سال گذشته جزو دشتهای ممنوعه به شمار می‌رود. بنابراین پژوهش در مورد اثر سناریوهای اقلیمی مختلف بر سطح آب زیرزمینی در دوره آتی دشت کرمان برای آگاهی مدیران و برنامه‌ریزی برای کاهش آثار منفی آن ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۱. محدوده آبخوان دشت کرمان

مدل‌های تغییر اقلیم (GCM¹)، وضوح مکانی پایینی را برای نشان دادن فرآیندها در مقیاس شبکه‌ای دارند، در این تحقیق بر آن شد که از روش مولدهای هواشناسی در ریزمقیاس نمایی خروجی مدل‌های AOGCM¹ استفاده شود. مولدهای هواشناسی یا WGS²، مولدهای تصادفی و

تغییر اقلیم

در مرحله نخست داده‌های مورد نیاز برای بررسی پدیده تغییر اقلیم شامل دمای روزانه (حداقل، متوسط، حداکثر) و بارش روزانه از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۱ از ایستگاه سینوپتیک کرمان جمع‌آوری شد. با توجه به اینکه خروجی خام

ارزیابی مدل

گام دوم در اجرای LARS-WG ارزیابی مدل است. در این مرحله باید تعیین شود که آیا این مدل برای تولید داده‌های تصادفی در مکان مورد مطالعه مناسب است یا خیر؟

ایجاد داده‌های مصنوعی

بعد از کالیبره کردن و ارزیابی مدل، باید پارامترهای هواشناسی تولید شوند. برای تولید داده‌های آب و هوای مصنوعی نیاز به یک سناریوی تغییر اقلیم است (Solomon, 2007). در این تحقیق از سه سناریو که بیشترین کاربرد را در میان سناریوها در زمینه مطالعات تغییر اقلیم دارند استفاده شده است. این سه سناریو شامل A2، A1B و B2 هستند (شکل ۲).

مدل‌سازی کمی آب زیرزمینی

مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی در وهله اول نیاز به شناخت سفره در شرایط طبیعی و سپس شبیه‌سازی آثار برداشت و یا تغذیه دارد. بی‌شک بهترین حالت شناخت رفتارهای یک سیستم سفره آب‌های زیرزمینی، انجام یک سری تحقیقات بلندمدت برای هر منطقه خاص است که با توجه به وضعیت کنونی و سقف محدود بودجه‌های تحقیقاتی عملاً امکان‌پذیر نیست. در این میان با ابزاری مانند شبیه‌سازی و یا مدل‌ها می‌توان با دقت قابل قبولی شرایطی مشابه آنچه در طبیعت موجود است را به وجود آورد و به نتایج رضایت‌بخشی دست یافت (محمدی و همکاران، ۱۳۸۵). نخستین مرحله برای تهیه مدل آب زیرزمینی جمع‌آوری نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، موقعیت و آمار چاه‌ها، ایستگاه‌های هیدرومتری، سینوپتیک و داده‌های مرتبط با آبخوان مورد نظر، نظیر هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، خواص ذخیره‌ای و تخلخل و ... است، در این تحقیق اطلاعات پایه‌ای مورد نیاز از شرکت مدیریت منابع آب ایران (تماب)، سازمان آب منطقه‌ای کرمان و سازمان هواشناسی کل کشور تهیه شد.

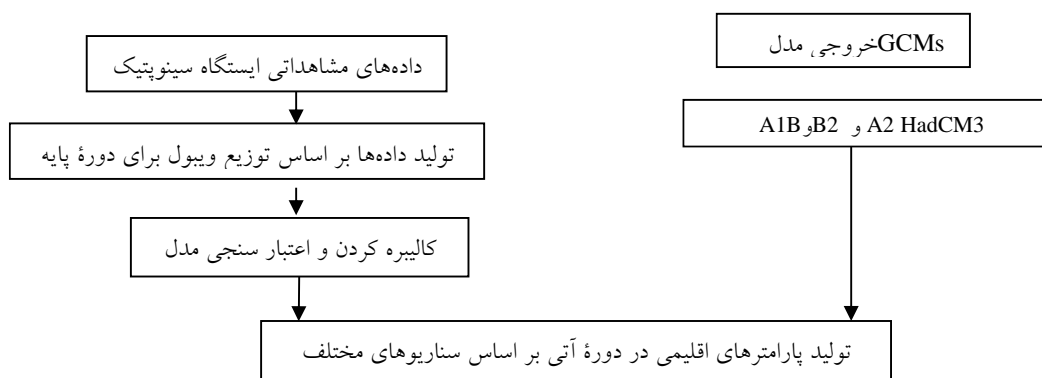
پیچیده‌ای هستند که خروجی آنها داده‌های هواشناسی در مقیاس روزانه است. این مدل براساس وقایع بارندگی در دوره‌های مرطوب و خشک پایه‌گذاری شده‌اند همچنین متغیرهای دیگری مانند مقادیر رطوبت، درجه حرارت و تابش خورشید اغلب در وقایع بارندگی مدل می‌شوند. در این روش تغییرات طول دوره‌های خشک و تر می‌تواند باعث شبیه‌سازی درجه حرارت و تابش خورشیدی شود. نخستین نسخه LARS-WG در بوداپست در سال ۱۹۹۰ ابزاری برای ریزمقیاس نمایی به روش آماری در کشور مجارستان ابداع شد. مبنای این مدل برای مدل‌سازی طول دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش توزیعی نیمه‌تجربی است. سری‌های فوریه درجه حرارت را تخمین می‌زنند. درجه حرارت‌های کمینه و بیشینه روزانه به‌صورت فرآیندهای تصادفی با میانگین و انحراف معیارهایی که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز مورد نظر هستند، مدل‌سازی می‌شوند. دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و تابش، خروجی‌های این مدل هستند. سه بخش اصلی این مدل عبارتند از: واسنجی مدل، ارزیابی مدل و تولید داده‌های هواشناسی. تولید داده‌های مدل LARS-WG در سه مرحله انجام می‌شود که عبارتند از: کالیبره کردن، ارزیابی و ایجاد داده‌های هواشناسی (باباییان و همکاران، ۱۳۸۸).

کالیبره کردن مدل

این مرحله دربرگیرنده تمام پارامترهای لازم برای تولید داده‌های مصنوعی است. LARS-WG خود همبستگی (در آمار، خود همبستگی یک فرآیند تصادفی همبستگی بین مقدارهای فرآیند در نقاط مختلف زمان را به‌عنوان تابع دو زمانه یا تفاضل زمانی توصیف می‌کند) میانگین بین داده‌های دیده‌بانی شده را برای مدل کردن دمای بیشینه و کمینه و تابش به کار می‌برد.

کردن داده‌ها، ساخت و تحلیل مدل دارد. همچنین در میان کدهای مختلف مدل‌سازی مدلی که بیشترین کاربرد را در زمینه کمیت آب‌های زیرزمینی در کشورهای مختلف دارد، کد Modflow است.

در این تحقیق از نرم‌افزار رابط GMS و کد Modflow استفاده می‌شود. این نرم‌افزار که مدل Modflow را در خود جای داده است، با امکانات مختلفی که به آن افزوده شده است نسبت به نرم‌افزار Modflow توانایی بیشتری در وارد



شکل ۲. چارچوب مدل LARS-WG

سیستم جریان آب زیرزمینی توسط ردیف‌ها، ستون‌ها و لایه‌ها به شبکه‌بندی از سلول‌ها تقسیم می‌شود. در هر سلول یک نقطه منفرد به نام گره وجود دارد که در آن تراز آب محاسبه می‌شود. برای ایجاد مدل جریان در نرم‌افزار GMS از روش مدل مفهومی استفاده می‌شود. ساختار مدل مفهومی آبخوان شامل محدوده مدل‌سازی و توزیع اولیه پارامترهای هیدروژئولوژیک، تخلیه چاه‌های بهره‌برداری و میزان آب برگشتی آنها، چاه‌های مشاهداتی، میزان تغذیه از سطح به آبخوان و شرایط مرزی آبخوان خواهد بود. از طرفی، وضعیت هندسی مدل در واقع مبین اندازه، شکل، مرزها و شبکه مدل است. برای اینکه بتوان معادلات دیفرانسیل جزئی را حل کرد، بایستی محیط را به اجزاء کوچکتری که اصطلاحاً سلول می‌نامند، تقسیم کرد. در مدل‌سازی آبخوان دشت کرمان، برای ایجاد شبکه‌ی کنواخت، ابعاد شبکه‌ها (سلول‌ها) با توجه به وسعت منطقه و نیز میزان آمار و اطلاعات موجود ۵۰۰×۵۰۰ متر و تعداد ستون‌ها ۹۸ و تعداد سطرها ۱۹۲ در نظر گرفته شد.

کد Modflow بر پایه حل معادلات حرکت آب‌های زیرزمینی است به طوری که حرکت سه بعدی آب زیرزمینی با چگالی ثابت به وسیله معادله دیفرانسیلی جزئی (رابطه ۱) با استفاده از روش تفاضل محدود و براساس معادله پیوستگی حل می‌شود.

(۱)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

K: هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)

h: بار پتانسیل (متر)

W: بیانگر شار حجمی در واحد حجم و نشانگر تغذیه

و تخلیه آب است.

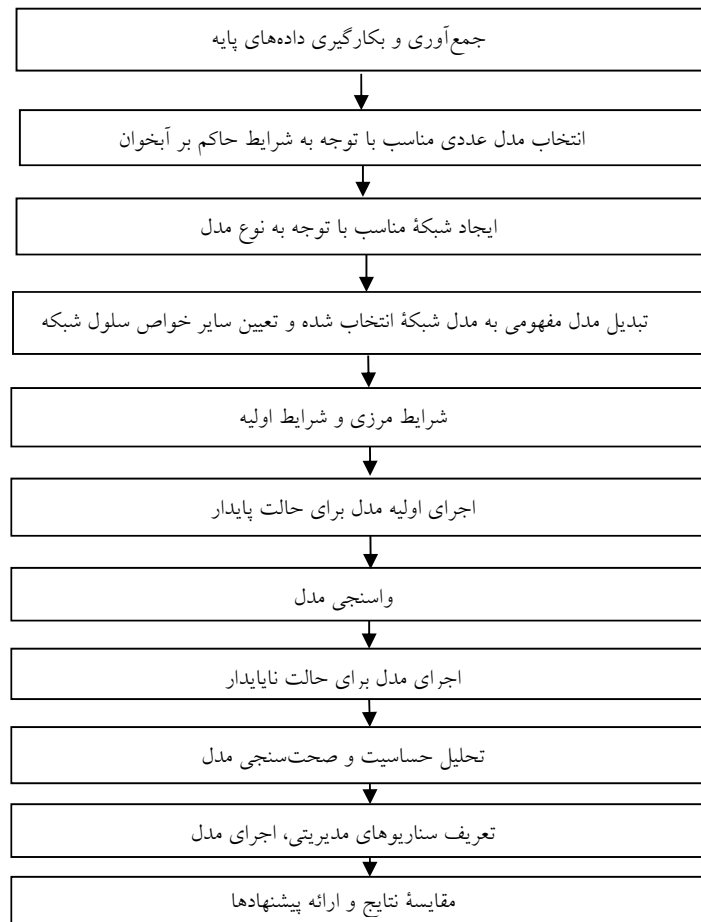
S_s: ذخیره مخصوص مواد متخلخل (یک بر متر)

t: زمان (روز)

x, y و z بیانگر مختصات.

همچنین روش عددی به کار گرفته شده در مدل

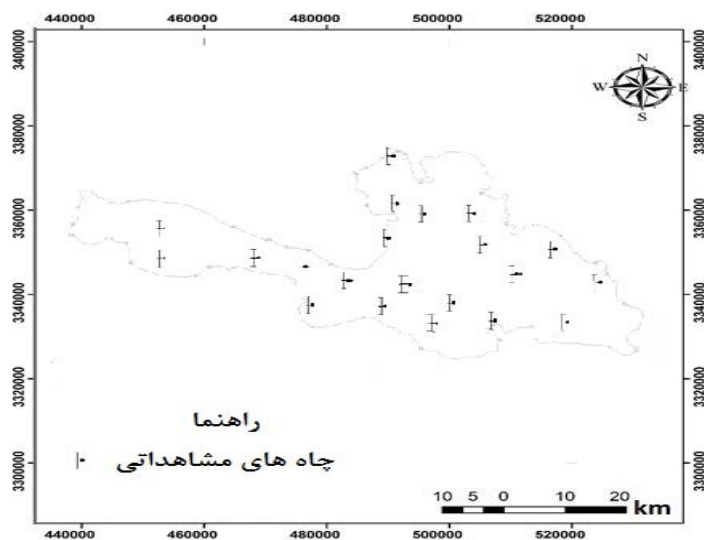
Modflow، روش تفاضل‌های محدود است. در این روش،



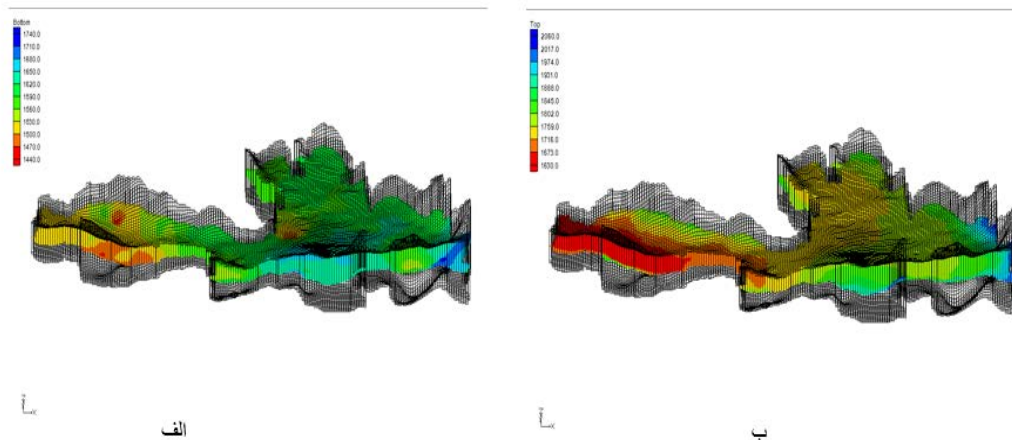
شکل ۳. مراحل کلی مدل‌سازی آب زیرزمینی با GMS

مقبولیت آن است. از این رو دقت در آمار چاه‌های مشاهداتی و صحت اعمال آنها به مدل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به سال حفر این چاه‌های مشاهده‌ای و نیز دوره‌های زمانی واسنجی و تصدیق مدل ریاضی، از چاه‌های مشاهده‌ای که در هر یک از دوره‌های زمانی مورد مدل‌سازی دارای آمار بوده‌اند و نوسانات این چاه‌های مشاهده‌ای بیانگر ارتباط واقعی آنها با سفره است به صورت مقتضی استفاده شده است بدین ترتیب، ۲۲ پیزومتر (چاه مشاهده‌ای) به مدل معرفی شد و به کمک این ۲۲ پیزومتر سطح ایستابی اولیه در مهرماه سال ۸۱ تهیه و به مدل معرفی شد. در شکل ۴ موقعیت پیزومترها در نرم‌افزار GMS نشان می‌دهد.

مهمترین پارامترهای هیدرودینامیکی که در تهیه مدل مؤثرند، قابلیت انتقال، هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و آبدهی ویژه آبخوان است. با توجه به نبود اطلاعات هدایت هیدرولیکی در منطقه مورد مطالعه داده‌های مربوط به ضریب قابلیت انتقال دشت کرمان از شرکت آب منطقه‌ای تهران تهیه شد و از تقسیم ضریب قابلیت انتقال به ضخامت لایه اشباع آبخوان، هدایت هیدرولیکی قسمت‌های مختلف دشت تخمین زده شد، مراحل آماده‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. با توجه به مطالعات انجام شده توسط وزارت نیرو، ضریب ذخیره آبخوان دشت کرمان به طور متوسط ۵ درصد در نظر گرفته شد و به مدل معرفی شد. همچنین چاه‌های مشاهداتی معیار محاسبات مدل و معیار سنجش



شکل ۴. موقعیت پیزومترها در محدوده دشت کرمان در نرم افزار GMS



شکل ۵. الف نقشه بستر آبخوان. ب نقشه سطح زمین

آب‌های زیرزمینی نیاز به تخصیص ارتفاع لایه تحتانی و فوقانی به هر سلول دارد. برای تهیه مدل مفهومی دشت کرمان وجود دو لایه تراز سنگ کف و تراز سطح زمین الزامی است. بدین منظور نخست مدل رقومی ارتفاعی دشت کرمان تهیه شده و به لایه نقطه‌ای تبدیل شده و وارد مدل GMS شد. برای تهیه نقشه سنگ کف دشت کرمان از داده‌های سونداژ برداشت شده از سطح دشت کرمان استفاده شد (شکل ۵).

از دیگر شرایط حل معادلات دیفرانسیل جزئی در آب زیرزمینی، وجود هد هیدرولیکی (شرایط اولیه) است تا

بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های موجود در سال ۱۳۸۹ تعداد ۱۰۹۹ حلقه چاه بهره‌برداری در دشت کرمان وجود دارد. حجم کل تخلیک سالانه از چاه‌های موجود در این آماربرداری حدود ۳۵۳/۴۹ میلیون مترمکعب محاسبه شده که در این مطالعه به دلیل فقدان اطلاعات از آمار تخلیه ۷۹۱ چاه بهره‌برداری استفاده شد. همچنین با توجه به ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و پیرامون دشت مقدار متوسط بارندگی برابر با ۱۲۲ میلی‌متر در سال بدست آمد. در نتیجه مقدار تغذیه آبخوان توسط بارندگی برابر با ۰/۰۰۰۰۱۶۷ متر بر روز بدست آمد. مدل‌های عددی

ماه مهر، انجام شده است. همچنین شبیه‌سازی سطح آب و واسنجی مدل در حالت غیر ماندگار در سال‌های آبی ۸۱-۹۱ انجام شده است و صحت‌سنجی آن در سال ۹۱-۹۲ انجام شد. همچنین جهت واسنجی مدل به دو صورت اتوماتیک و دستی انجام گرفت. به‌منظور محاسبه اختلاف سطح ایستابی شبیه‌سازی شده و سطح ایستابی مشاهده شده در چاه‌های پیژومتری و تجزیه و تحلیل آنها، از آنالیز باقی‌مانده استفاده می‌شود که پایین بودن این اختلاف نشان‌دهنده انطباق و دستیابی بیشتر به اهداف کالیبره کردن و دقت مدل به‌دست آمده است. سه معیار برای آنالیز باقی‌مانده‌ها وجود دارد (روابط ۲، ۳ و ۴):

$$ME = \frac{1}{n} \sum_i^n (h_m - h_s)_i \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_i^n |(h_m - h_s)_i| \quad (3)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (h_m - h_s)_i^2} \quad (4)$$

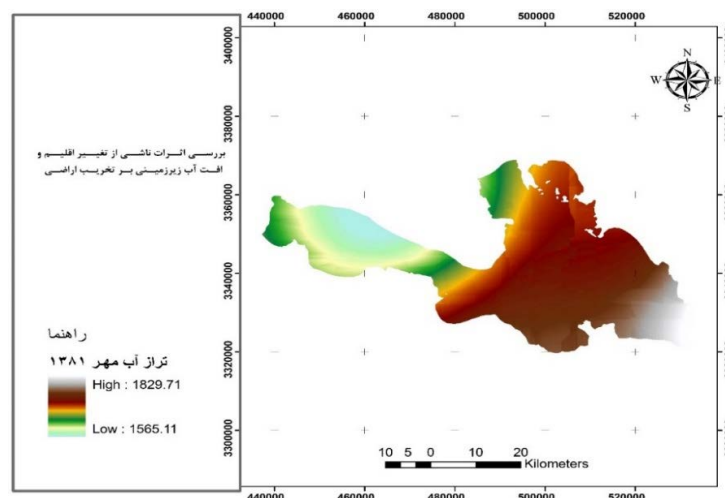
n = تعداد چاه‌های مشاهده‌ای

h_m = مقادیر سطح آب مشاهده شده به متر

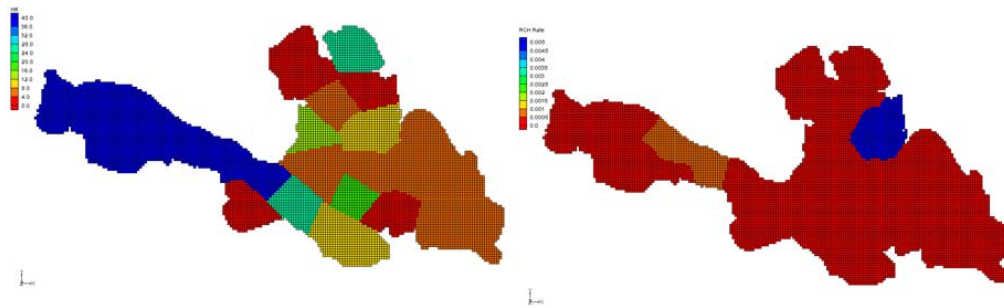
h_s = مقادیر سطح آب شبیه‌سازی شده به متر

در این تحقیق از پارامتر RMSE برای محاسبه اختلاف سطح ایستابی شبیه‌سازی شده و سطح ایستابی مشاهده شده در چاه‌های پیژومتری و تجزیه و تحلیل آنها استفاده شد.

مدل بتواند به‌وسیله اعداد پایدار و ارقام آن از یک نقطه محاسبات را شروع کرده و ادامه دهند. شرایط نخستین در حالت رژیم پایدار به‌صورت فرضی انتخاب شده و مدل با حل معادلات و با توجه به شرایط مرزی، مقادیر ارتفاع سطح آب در سلول‌های داخلی را محاسبه می‌کند. در حالت رژیم ناپایدار، شرایط نخستین مربوط به شروع محاسبات است و مدل با استفاده از آن، مقادیر ارتفاع سطح ایستابی را در گام‌های زمانی بعدی، محاسبه می‌کند. گام زمانی در نظر گرفته شده برای حل معادلات دیفرانسیل به‌صورت یک‌روزه و دوره‌های تنش به‌صورت ماهانه است. به‌منظور بررسی مدل در حالت پایدار، می‌توان در زمان حداقل سطح ایستابی متوسط آبخوان یا حداکثر آن که منحنی هیدروگراف در حال تغییر جهت از نزولی به صعودی یا بالعکس است، استفاده کرد. در این ماه تغییرات سطح ایستابی در طول ماه تقریباً ناچیز است، بنابراین در نظر گرفتن فرض پایداری دور از ذهن نیست. نقشه تراز سطح آب زیرزمینی در سال آبی ۸۱-۸۲ در مهرماه، برای حالت پایدار و همچنین به‌عنوان شرایط نخستین حالت ناپایدار وارد مدل شد (شکل ۶). در این تحقیق سال آبی ۸۱-۸۲ به علت کامل بودن اطلاعات در این سال به‌عنوان سال پایه شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. در این مطالعه واسنجی مدل در حالت ماندگار در سال آبی ۸۱-۸۲ و در



شکل ۶. تراز آب زیرزمینی آبخوان در مهر ماه ۱۳۸۱ (متر)



شکل ۷. الف. نقشه هدایت هیدرولیکی ب. نقشه پهنه‌بندی تغذیه سطحی (متر بر روز) در شرایط پایدار (مهرماه ۱۳۸۱)

سناریو در پیش‌بینی رفتار اجتماعی اقتصادی و انسانی در آینده است.

نتایج

نخست تغییر اقلیم با کمک مدل اقلیمی LARS-WG شبیه‌سازی شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG، سری‌های زمانی روزانه دما و بارش در دوره ۱۳۹۰-۱۴۱۰ به صورت مستقیم با استفاده از شبیه‌سازی مدل HADCM3 در مدل LARS-WG تحت سناریو انتشار (A2، B1 و A1B) برای ایستگاه سینوپتیک کرمان تولید شد و تغییرات آن نسبت به دوره پایه در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است.

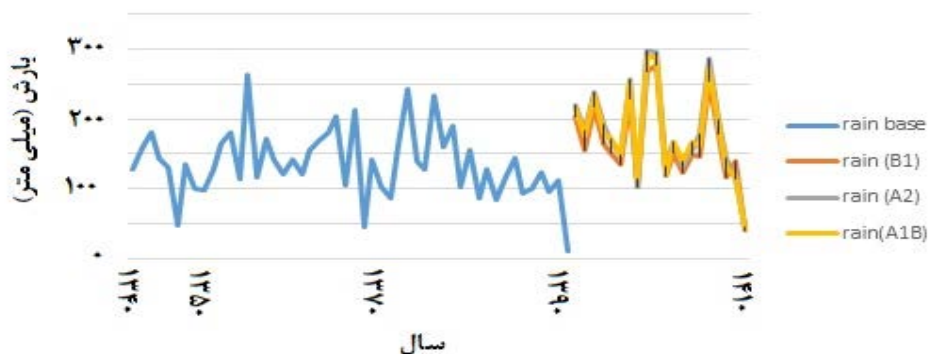
نتایج مدل LARS-WG طی دوره آماری (۱۳۹۰-۱۴۱۰) حاکی از افزایش بارش در فصل‌های زمستان و بهار و افزایش دما در فصل‌های تابستان و پاییز است. جدول ۱ درصد تغییرات بلند مدت دما و بارش را به صورت فصلی و سالانه نشان می‌دهد.

در بخش دیگری از پژوهش به مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی با مدل GMS پرداخته شد. شکل ۱۰، هیدروگراف معرف ترسیم شده طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ با استفاده از آمار چاه‌های پیزومتری را نشان می‌دهد. هیدروگراف نشان می‌دهد که افت سطح ایستابی به طور متوسط ۱/۴۶ متر در سال در دشت کرمان در این بازه زمانی رخ داده است.

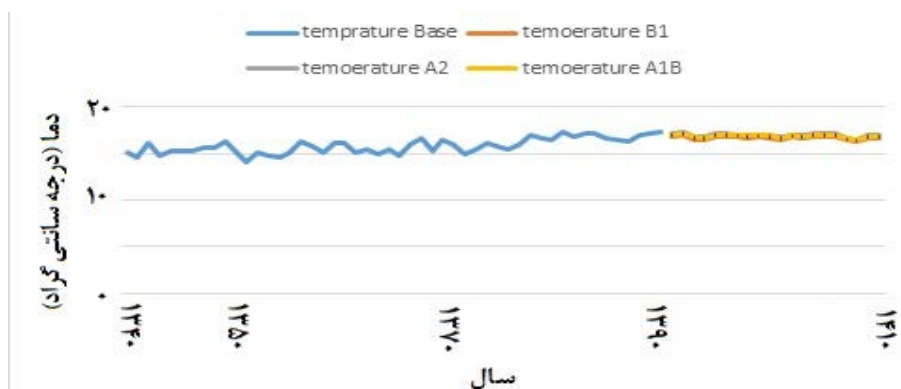
پس از اجرای مدل در حالت پایدار، برای به دست آوردن نقشه هدایت هیدرولیکی نخست با تقسیم نقشه قابلیت انتقال بر نقشه ضخامت آبخوان، نقشه نخستین هدایت هیدرولیکی تهیه شد. سپس با کالیبره کردن اتوماتیک و دستی متعدد از طریق بسته PEST، نقشه هدایت هیدرولیکی با دقت قابل قبول و منطبق با واقعیت بدست آمد. شکل ۷ نقشه هدایت هیدرولیکی و تغذیه سطحی بدست آمده پس از کالیبره کردن مدل در شرایط پایدار را نشان می‌دهد.

عدم قطعیت

قاعدتاً در هنگام مدل‌سازی، عدم قطعیت ناشی از داده‌ها و همچنین مدل‌سازی وجود دارد. عدم قطعیت در هنگام اندازه‌گیری پارامترهای آب و اقلیم و عدم قطعیت در بدست آوردن پارامترهای تغذیه و هدایت هیدرولیکی ناشی از پوشش گیاهی مختلف در بخش‌های مختلف دشت کرمان وجود دارد. همچنین در مورد پیش‌بینی وضعیت منابع آب زیرزمینی نیز بحث‌های مربوط به وضعیت جمعیت در آینده و همچنین نحوه و میزان بهره‌برداری از منابع آب نیز از عدم قطعیت‌های دیگر در بحث مدل‌سازی منابع آب است. از سویی دیگر عدم قطعیت مدل‌های GCM، به دلیل دانش ناقص در مورد فرآیندهای ژئوفیزیکی اساسی، قدرت تفکیک شبکه‌های درشت و فرآیندهای حل نشده‌ای که به محدودیت‌هایی در دقت و صحت مدل‌ها می‌انجامد. همچنین عدم قطعیت



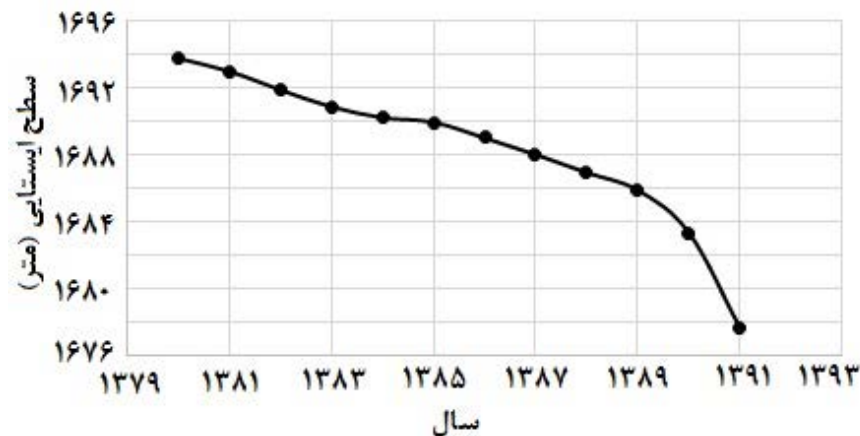
شکل ۸. تغییرات بارش منطقه در دوره (۱۳۹۰-۱۴۱۰) نسبت به دوره پایه تحت سناریوی انتشار (A1B و B1، A2)



شکل ۹. تغییرات دمای منطقه در دوره (۱۳۹۰-۱۴۱۰) نسبت به دوره پایه تحت سناریوی انتشار (A1B و B1، A2)

جدول ۱. درصد تغییرات میانگین بلند مدت بارش و دمای شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر پایه

پارامتر	سناریو	% بهار	% تابستان	% پاییز	% زمستان	% تغییرات سالانه
بارش	A2	۱۳۳/۰۴	-۵۹/۱۵	-۷۹/۱۵	۲۴۰/۸۴	۳۱/۷۱
بارش	B1	۱۰۰/۱۳	-۶۱/۰۵	-۷۱/۹۳	۲۱۷/۴۵	۱۹/۴۰
بارش	A1B	۱۳۲/۶۹	-۵۸/۹۱	-۸۲/۷۶	۲۲۵/۷۸	۲۹/۲۶
دمای متوسط	A2	-۱۷/۳۸	۶۲/۶۸	۲۶/۲۱	-۳۵/۳۰	۸/۰۳
دمای متوسط	B1	-۲۰/۴۴	۶۱/۲۷	۲۵/۷۶	-۳۸/۳۸	۶/۰۹
دمای متوسط	A1B	-۱۹/۲۹	۶۴/۰۸	۲۶/۷۹	-۳۸/۰۲	۷/۳۵



شکل ۱۰. هیدروگراف معرف آبخوان طی سالهای ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳

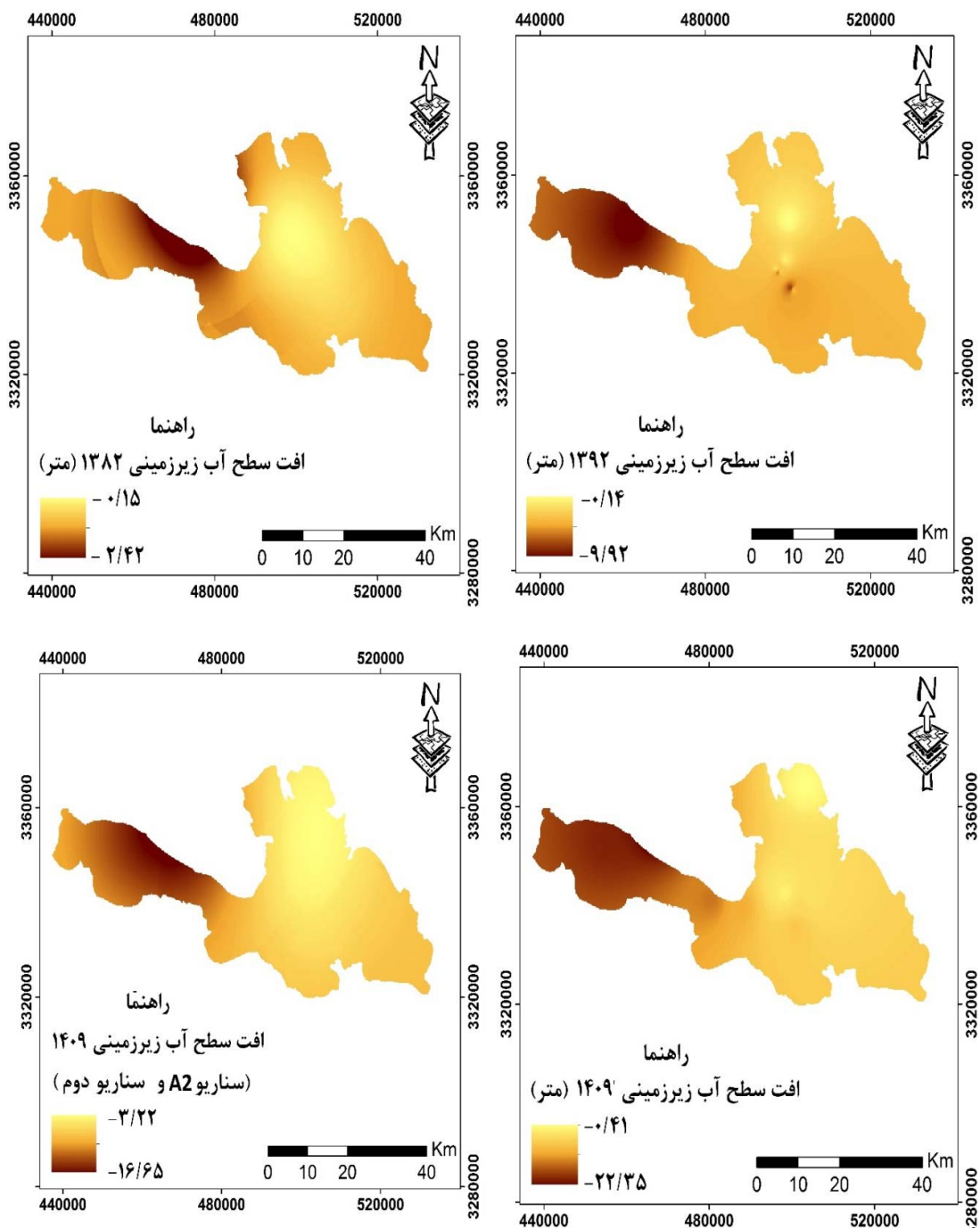
سناریوی دوم: ادامه روند کنونی در آینده بر اساس بهره‌برداری کنونی و شرایط اقلیمی سناریوی B1, A2 و A1B در این سناریو فرض بر این است که بهره‌برداری یکنواختی از آب زیرزمینی صورت بگیرد. اما شرایط اقلیمی طبق سناریوی B1, A2 و A1B تغییر کند. سناریوی سوم: ادامه روند کنونی با ۱۰ درصد افزایش در بهره‌برداری از آب زیرزمینی و شرایط اقلیمی سناریو B1, A2 و A1B

سناریوی چهارم: ادامه روند کنونی با ۲۰ درصد افزایش در بهره‌برداری از آب زیرزمینی و شرایط اقلیمی سناریو B1, A2 و A1B (شکل ۱۱). متوسط افت آب زیرزمینی در هر چهار سناریو، برای سناریوی اول (۰/۸۶، -۵/۸۵ و -۹/۱۹)، سناریوی دوم در حالت A2, A1B و B1 (-۹/۳۶، -۹/۴۹ و -۱۲/۰۹، -۱۲/۲۱ و -۱۲/۲۸) و سناریوی چهارم در حالت A2, A1B و B1 (-۱۵/۴۳، -۱۵/۵۵ و -۱۵/۵۸) است.

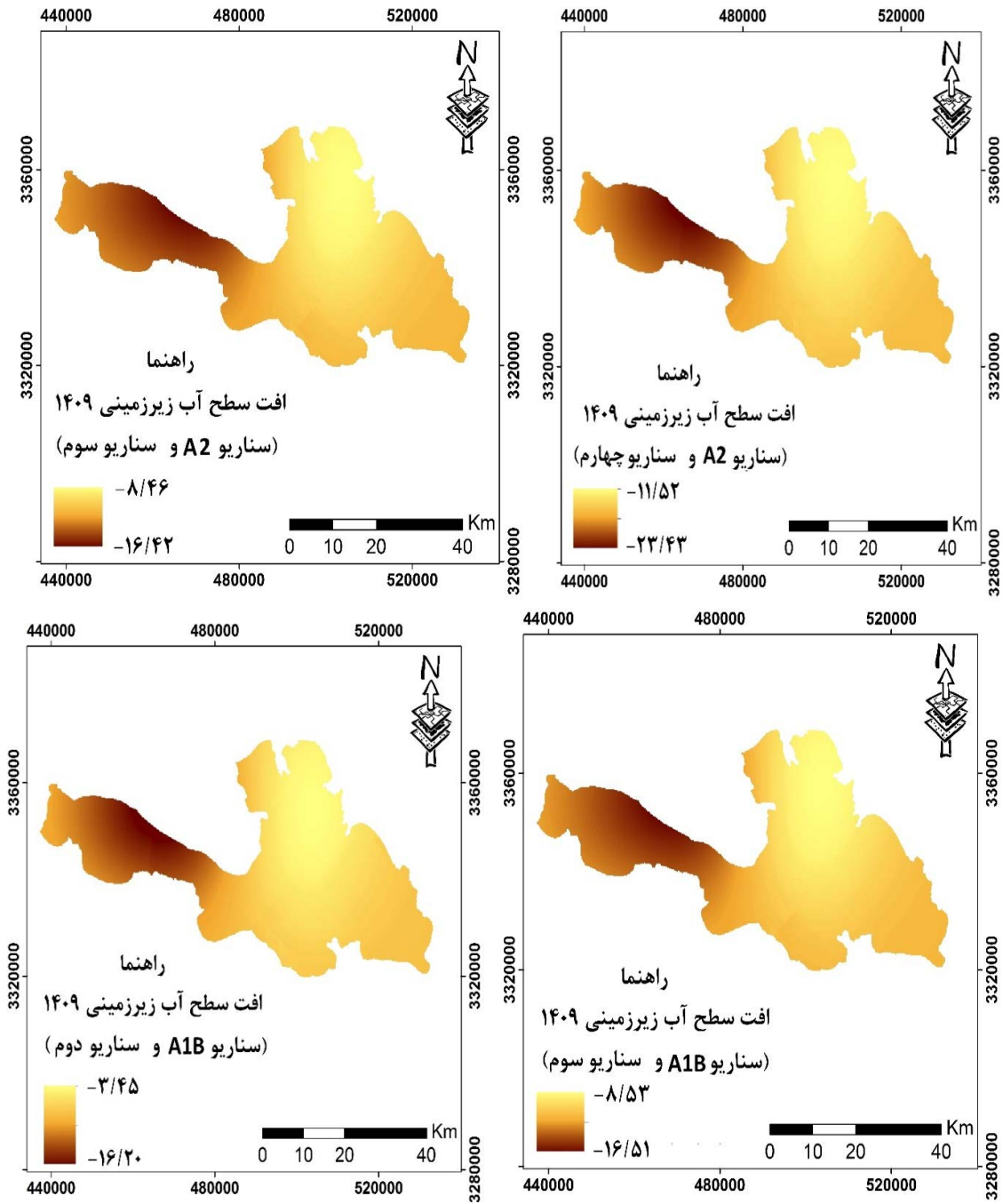
برای بررسی میزان دقت محاسبه شده توسط مدل در حالت پایدار، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین مقادیر سطح ایزتابی در چاه‌های مشاهده‌ای، با مقادیر محاسبه شده توسط مدل در مهر ۸۱ بدست آمد که برابر با ۱/۳۷ بوده و دقت بالای مدل را نشان می‌دهد. می‌توان گفت مدل واسنجی شده از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و مدل ریاضی می‌تواند به خوبی شرایط طبیعی حاکم بر آبخوان دشت کرمان را شبیه‌سازی کند. بنابراین می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر نوسانات آب زیرزمینی در دوره‌های آتی استفاده کرد.

با هدف ارزیابی وضعیت منابع آب زیرزمینی از مهر ۱۳۸۱ تا مهر ۱۴۰۹ و ارائه راهکار مدیریتی، چهار سناریو مد نظر قرار گرفت و میزان افت سطح ایزتابی نسبت به شرایط نخستین برای سال ۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۹ نسبت به دوره مبنای شبیه‌سازی شد.

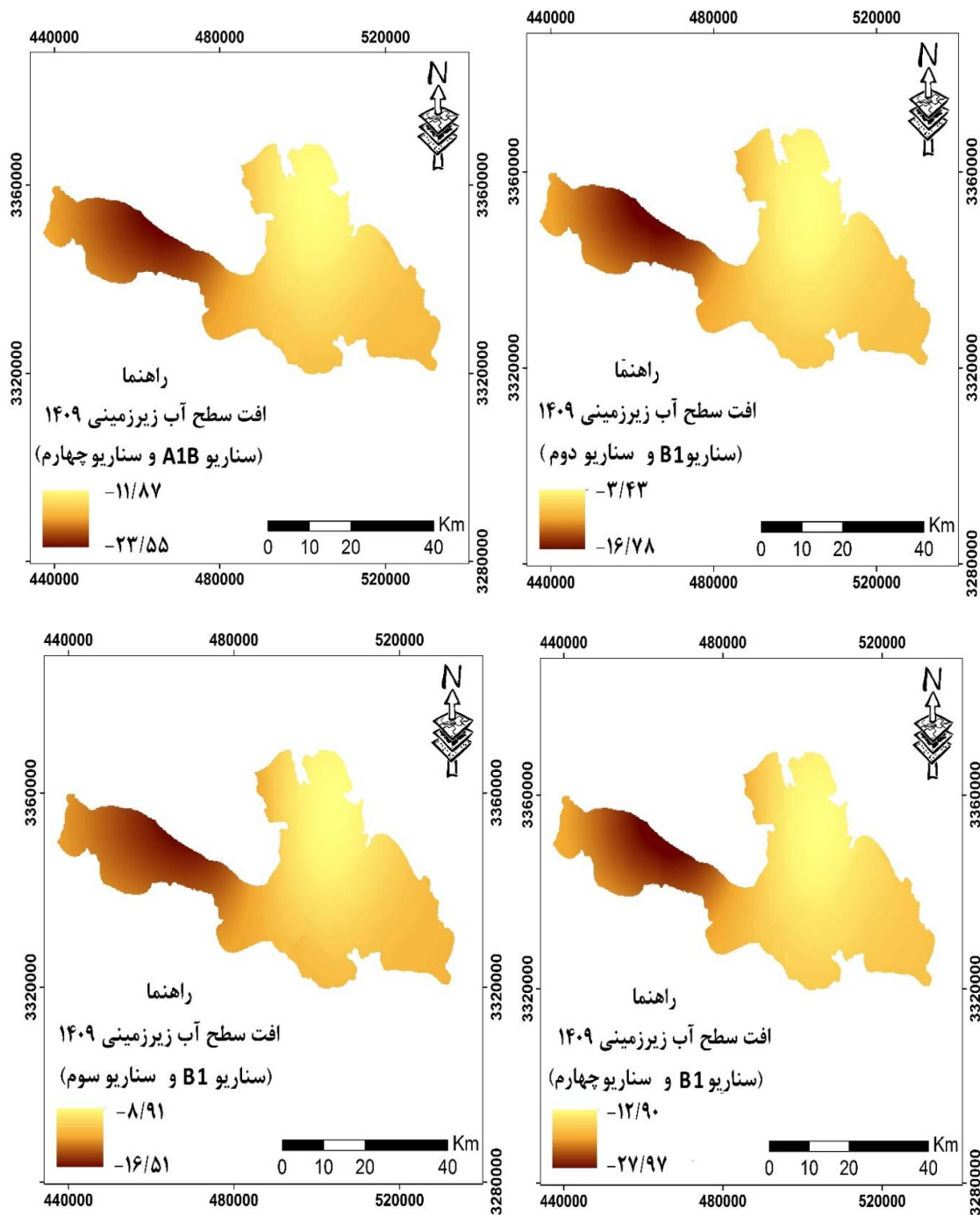
سناریوی اول: ادامه روند کنونی برداشت از آبخوان در آینده بر اساس بهره‌برداری ثابت و بدون تغییر اقلیم به منظور ارزیابی مدیریت آبخوان در شرایط فعلی و پاسخ به این سؤال اساسی که با روند برداشت کنونی، بدون تغییر در شرایط اقلیم، تغییرات افت آبخوان طی دوره آتی نسبت به دوره پایه به چه میزان خواهد بود.



شکل ۱۱. تغییرات تراز سطح آب نسبت به سال ۱۳۸۱



ادامه شکل ۱۱. تغییرات تراز سطح آب نسبت به سال ۱۳۸۱



ادامه شکل ۱۱. تغییرات تراز سطح آب نسبت به سال ۱۳۸۱

نرم‌افزار LARS-WG تحت سناریو انتشار A2، A1B و B1 است. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG، سری‌های زمانی روزانه دما و بارش در دوره ۱۳۹۰-۱۴۱۰ به صورت مستقیم با استفاده از شبیه‌سازی مدل HADCM3

بحث و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی آثار ناشی از تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی در دشت کرمان با به‌کارگیری مدل عددی آب زیرزمینی GMS و مدل اقلیمی HADCM3 و

حالت پایدار و ناپایدار به ترتیب ۱۸/۱۹ و ۱۵/۲۵ بدست آمد. تمرکز زیاد چاه‌های بهره‌برداری در قسمت‌های مرکزی و غرب دشت و قسمت جنوب شرق تأثیر قابل توجهی بر منحنی‌های تراز آب زیرزمینی داشته و به همین علت جریان‌های آب زیرزمینی اطراف به سمت این محدوده متمرکز شده است. بر اساس نتایج واسنجی در شرایط غیرماندگار، میزان پارامتر آبدی ویژه برابر با ۰/۰۰۰۲۰ تا ۰/۵ است و متوسط آن ۰/۰۸۳ بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد که طی دوره ده ساله (۱۳۸۱-۱۳۹۱) متوسط افت آبخوان ۵/۸۵ است که حداقل افت تراز آب زیرزمینی از ۱/۲۳ متر در قسمت شرقی به حداکثر آن یعنی ۱۱ متر در قسمت غربی آبخوان می‌رسد. نتایج حاصله نشان دهنده افت سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی است که باید با برنامه‌ریزی صحیح در مصرف منابع آب صرفه‌جویی کرد و راهکارهایی را برای سازگاری در برابر تغییر اقلیم اجرا کنیم. برای جلوگیری از افت سطح آب زیرزمینی باید در الگوی مصرف آب در بخش‌های مختلف تجدیدنظر شود. در بخش کشاورزی باید سیستم آبیاری تغییر کند، الگوی کشت نیز به سمت محصولات کم آبخواه برود. همچنین به دلیل اثرگذاری تغییر اقلیم چه بصورت مستقیم و چه غیرمستقیم باید راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم را تدوین کرد تا بر اساس آن در مصرف آب صرفه‌جویی شود.

یادداشت‌ها

1. General circulation model
2. Atmosphere-Ocean Global Circulation Model
3. Stochastic weather generators

در مدل LARS-WG تحت سناریو انتشار (A2, B1 و A1B) برای ایستگاه سینوپتیک کرمان تولید شد و تغییرات آن نسبت به دوره پایه برای پارامترهای بارش و دما منطقه در دوره آتی بررسی شد. نتایج مدل LARS-WG طی دوره آماری (۲۰۱۱-۲۰۳۰) حاکی از افزایش بارش در فصل‌های زمستان و بهار و افزایش دما در فصل‌های تابستان و پاییز است. همچنین تغییرات سالانه بارش در سناریو A2, A1B و B1 طی دوره آتی به ترتیب ۳۱/۷۱، ۲۹/۲۶ و ۱۹/۴۰ درصد افزایش بارش و در مورد دمای متوسط این مقادیر به ترتیب ۸/۰۳، ۷/۳۵ و ۶/۰۹ درصد افزایش دمای سالانه را شاهد بودیم که با نتایج جعفری و همکاران (۱۳۹۳)، که بیان داشتند که مقادیر دما و بارش در دوره آتی نسبت به حالت پایه به ترتیب به میزان ۴/۷۴ و ۱۳/۹۲ درصد در سناریو A2 و ۲/۸۸ و ۱۶/۴۸ درصد در سناریو B2 افزایش می‌یابد، همچنین نتایج نشان داد که طی دوره آماری (۱۳۹۰-۱۴۱۰) حاکی از افزایش دمای منطقه در تمام فصل‌های سال و افزایش بارش در فصل‌های زمستان و بهار است، مطابقت دارد. در زمینه افت آبخوان دشت کرمان نتایج حاکی از این بود که مقدار خطای مدل واسنجی شده از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و مدل ریاضی می‌تواند به خوبی شرایط طبیعی حاکم بر آبخوان دشت کرمان را شبیه‌سازی کند. بنابراین می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر نوسانات سطح آب زیرزمینی در دوره‌های آتی استفاده کرد. بر اساس نتایج این تحقیق، میزان پارامتر هدایت هیدرولیکی بر اساس نتایج واسنجی در حالت ماندگار بین کمترین مقدار ۶ متر در روز و بیشترین مقدار ۴۰ متر در روز متغیر است. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی مربوط به قسمت‌هایی از مرکز و غرب آبخوان دشت کرمان است که کمترین آن مربوط به قسمت‌های شرقی دشت است. همچنین در مرحله واسنجی ناپایدار ده ساله این مقدار برابر با ۲/۰۳ و حداکثر آن ۴۰ متر در روز بدست آمد. همچنین متوسط این مقدار در

منابع

- آذر، علی. ۱۳۹۵. مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی و تخریب اراضی (مطالعه موردی: دشت قزوین). رساله دکتری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- امیدوار، کمال، جعفری ندوشن، مهدی. ۱۳۹۳. اثر نوسان قطبی بر نوسان های دما و بارش فصل زمستان در ایران مرکزی. فصلنامه جغرافیایی سرزمین. ۷۶-۶۵: (۴۱)۱.
- بابائیان، ا.، نجفی، ز.، زابل عباسی، ف.، جیبی نوخندان، م.، ادب، ح.، ملبوسی، ش. ۱۳۸۸. ارزیابی تغییر اقلیم در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمای داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G، ۷ (۱۶): ۱۵۲-۱۳۵.
- خلق ذکر آباد، ز. محمدزاده، ه.، ناصری، ح. نظری، ر. ۱۳۹۱. شبیه سازی سیستم جریان آب زیرزمینی دشت زاوه - تربت حیدریه با استفاده از کد MODFLOW، ۱۶ کنفرانس سنگ شناسی، شیراز.
- رضاپور طبری، م.، علی بیگی، م. ۱۳۹۳. کالیبراسیون خودکار پارامترهای آبخوان با استفاده از مدل ریاضی گسترده آبخوان و الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم، مجله آب و فاضلاب: ۲۵(۳): ۹۸-۱۰۹.
- سلاجقه، رفیعی ساردویی، مقدم‌نیا، ملکیان، عراقی نژاد، شهاب، خلیقی سیگارودی، صالح پورجم، امین. ۱۳۹۶. بررسی کارایی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی دما و بارش. تحقیقات آب و خاک ایران ۲(۴۸): ۲۶۲-۲۵۳.
- علیزاده، ا. ۱۳۹۲. اصول هیدرولوژی کاربردی، ویرایش سی‌وششم، انتشارات امام رضا، دانشگاه مشهد.
- محمدی، د.، بخشنده، غ. ۱۳۸۵. ارزیابی توانایی‌ها و محدودیت‌هایی از استفاده نرم افزار برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی‌های آب زیرزمینی، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب. اصفهان.
- مساح، ع.، مرید، س. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر عدم قطعیت در توزیع تجمعی احتمالاتی رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم، دومین کنفرانس منابع آب ایران، اصفهان.
- Ertürk, A., Ekdal, A., Gürel, M., Karakaya, N., Guzel, C., and Gönenc, E. 2014. Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed. *Science of the Total Environment*. 499: 437-447
- Etemadi, H., Samadi, S., & Sharifikia, M. 2014. Uncertainty analysis of statistical downscaling models using general circulation model over an international wetland. *Climate dynamics*, 42(11-12), 2899-2920.
- Guar, Sh., Chahar, B.R., and Grailot, D. 2011. Combined use of Groundwater Modeling and Potential Zone Analysis for Management of Groundwater. *Journal of Applied Earth Observation and Geofomation*. 13:127-139.
- Hassan, Z., Shamsudin, S., & Harun, S. 2014. Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. *Theoretical and applied climatology*, 116(1-2), 243-257.
- Herrmann, F., Baghdadi, N., Blaschek, M., Deidda, R., Duttman, R., Sapriza-Azuri, G., Jódar J, Carrera Jesús, V. and Gupta, H. 2015. Toward a comprehensive assessment of the combined impacts of climate change and groundwater pumping on catchment dynamics. *Journal of Hydrology*. 529: 1701-1712.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguier, M., VanDer Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., and Johnson, C.A. 2001. *The Scientific Basis Contribution of Working Group I of The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change*. New York, Ny: Cambridge University Press.
- Jang, C. S., Liu, C. W., & Chou, Y. L. 2012. Assessment of groundwater emergency utilization in Taipei Basin during drought. *Journal of hydrology*, 414, 405-412.
- Koch, M., & Cherie, N. 2013. Mono-and multi-modal statistical downscaling of GCM-climate predictors for the Upper Blue

Nile River basin, Ethiopia. In Proceedings of the 6 th International Conference on Water Resources and Environment Research, ICWRER (3-7).

Narula, K. K., & Gosain, A. K. 2013. Modeling hydrology, groundwater recharge and non-point nitrate loadings in the Himalayan Upper Yamuna basin. *Science of The Total Environment*, 468, S102-S116.

Lemieux, J., Hassaoui, J., Molson, J., Therrien, R., Therrien, P., Chouteau, M., and Ouellet, M. 2015. Simulating the impact of climate change on the groundwater resources of the Magdalen Islands, Québec, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 3: 400–423.

Mani, A., T.C.Tsai, F., Kao Shih-Chieh, S., Naz Bibi, A., and Rastogi, D. 2016. Conjunctive management of surface and groundwater resources under projected future climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 540: 397–411.

Noori, M., Sharifi, M. B., Zarghami, M., & Heydari, M. 2013. Utilization of LARS-WG Model for Modelling of Meteorological Parameters in Golestan Province of Iran. *Journal of River Engineering*, 1.

Samadi, S. Z., Mahdavi, M., Sharifi, F., and Bihamta, M.R. 2009. Methodology for selecting the best predictor for climate change impact assessment in Karkheh Basin, Iran. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 4: 249–256.

Shrestha, S., Viet Bach, T., and Prasad Pandey, V. 2016. Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science & Policy* 61: 1–13

Solomon, S. 2007. *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. UK: Cambridge University Press.

Yoshioka, Y., Nakamura, K., Horino, H., and Kawashima, S. 2016. Numerical assessments of the impacts of climate change on regional groundwater systems in a paddy-dominated alluvial