

## ارزیابی ریسک تأثیرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان گتوند- عقیلی)

سعید حمزه<sup>\*</sup>، زهرا باقرپور طوله‌لات<sup>۱</sup>، مهدی دلقندی<sup>۳</sup>، حمید کاردان مقدم<sup>۴</sup>

۱. استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه ملایر

۳. استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود

۴. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۲۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۴/۰۲)

### چکیده

در این پژوهش تأثیرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی در آبخوان گتوند- عقیلی بررسی شد. به این منظور شبیه‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW در محیط GMS برای یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۸۱-۱۳۹۱) انجام شد. مقادیر خطای RMSE به دست آمده از واسنجی مدل برای یک دوره شش‌ساله در دو حالت ماندگار و غیرماندگار به ترتیب برابر با ۰/۷۵۱ و ۰/۸۵۲ متر و میزان میانگین ضریب همبستگی ۰/۸۲ برای دوره چهارساله صحت‌سنجی به دست آمد. سپس، برای مطالعه تأثیر تغییر اقلیم روی سطح آب زیرزمینی از خروجی ۱۰ مدل AOGCM تحت سناریوی انتشار RCP8.5 مربوط به آخرین گزارش ارزیابی IPCC، برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی استفاده شد. به این منظور دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به عنوان دوره پایه و ۲۰۱۵-۲۰۲۴ به عنوان دوره پیش‌بینی انتخاب شد. در نهایت، پنج سناریوی اقلیمی (در سطوح ریسک ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۰/۹۰) برای دوره آتی تولید شد. سپس، نوسانات سطح آب زیرزمینی تحت این سناریوهای مختلف تغییر اقلیم تعیین شد. بر اساس نتایج در سطح ریسک ۰/۱ بیشترین میزان افت آبخوان (۱/۸ متر) و در سناریوی سطح ریسک ۰/۹۰ افزایش سطح آب زیرزمینی به میزان ۰/۴۳ متر طی ۱۰ سال ۲۰۱۵-۲۰۲۴ پیش‌بینی شد.

**کلیدواژگان:** آبخوان گتوند- عقیلی، ارزیابی ریسک، تراز آب زیرزمینی، تغییر اقلیم.

## مقدمه

در حال حاضر، منابع آب زیرزمینی بخش عمده‌ای از مصارف آب را تأمین می‌کنند، به طوری که ۳۶ درصد مصارف شرب، ۴۲ درصد بخش کشاورزی و ۲۷ درصد مصرف صنعتی از این منابع تأمین می‌شود [۱]. افزایش جمعیت، محدودیت زمانی و مکانی برای بهره‌برداری از منابع آب‌های سطحی سبب مصرف بیش از اندازه منابع آب زیرزمینی شده که این مصرف زیاد به افت شدید سطح آب در آبخوان‌های کشور منجر شده است. از طرفی، آثار تغییر اقلیم نیز از طریق تأثیر بر منابع تغذیه و تخلیه آبخوان‌ها نیز سبب افزایش تنش به این منابع شده است [۲]. کشور ایران به عنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک کره زمین، با محدودیت منابع آب و مسئله کم‌آبی روبه‌روست. از سوی دیگر، نوسانات زیاد آب و هوایی و وقوع خشکسالی‌های متناوب و طولانی، کمبود آب را تشدید کرده و اهمیت مدیریت و برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را بیش از پیش نشان داده است.

در دهه‌های اخیر، رشد صنایع و کارخانه‌ها از یک طرف و جنگل‌زدایی و تخریب محیط زیست از طرف دیگر، سبب افزایش روزافزون انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح کره زمین شده است. گازهای گلخانه‌ای به دلیل عبور نورخورشید و عبور نکردن بازتابش آن توازن انرژی کره زمین را بر هم زده و سبب افزایش دمای اتمسفر شده است [۳ و ۴]. از این پدیده به عنوان گرمایش زمین و یا به بیانی دیگر، تغییر اقلیم یاد می‌شود که به طور مسلم می‌تواند تأثیر معناداری بر آب‌های زیرزمینی داشته باشد. با توجه به گزارش ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، روند گرم شدن کره زمین، که بیشتر توسط افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد می‌شود، در سال‌های آتی تداوم خواهد داشت [۵]. بنابراین، به نظر می‌رسد برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب برای سال‌های پیش رو بدون در نظر گرفتن تغییر اقلیم ناسنجیده باشد. بنابراین، در این مطالعه به منظور مطالعه جامع روی آبخوان گتوند- عقیلی به عنوان عامل تصمیم‌گیری تأمین آب در سال‌های آتی، تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی در این آبخوان، صورت پذیرفت. مدیریت آب زیرزمینی به فهمی درست از سیستم آب زیرزمینی و بررسی و مدل‌سازی آن نیاز دارد. به همین دلیل برای مدل‌سازی آب زیرزمینی از

مدل ریاضی MODFLOW در محیط GMS استفاده شده است که مدلی توانمند و جامع است.

مطالعاتی نیز در این زمینه صورت گرفته است. از جمله پاندا<sup>۱</sup> و همکارانش [۶] روند سطح آب زیرزمینی در Gujarat واقع در غرب هند را کمی کردند. نتایج پژوهش آنها بیان می‌کند که در مناطق ساحلی مرطوب و نیمه‌مرطوب بارش‌های بیش از اندازه سبب افزایش تلفات رواناب و در مناطق خشک و نیمه‌خشک، خشکسالی موجب آسیب‌پذیر شدن سفره‌های آب زیرزمینی شده است. ارتوک<sup>۲</sup> و همکارانش [۷] تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی را در حوضه‌های کوچک مدیترانه‌ای بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها کاهش درخور توجه در تغذیه آب‌های زیرزمینی و ذخیره‌سازی و کمبود آب در دوره‌های آبی را در این منطقه پیش‌بینی می‌کند. نادریان‌فر و همکارانش [۸] روند تغییرات نوسانات سطح آب زیرزمینی در حوضه آبریز نیشابور را تحت شرایط اقلیمی مختلف بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد بارندگی‌ها با یک تأخیر ۱۰ ماهه بیشترین تأثیر را روی سطح آب زیرزمینی دشت خواهند داشت. همچنین، نتایج این تحلیل نشان داد خشکسالی‌های اقلیمی در کوتاه‌مدت روی سطح آب زیرزمینی اثری ندارند، اما در بلندمدت سبب افت سطح آب زیرزمینی می‌شوند. الطافی دادگر و همکارانش [۹] جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت بجنورد را با تأکید بر تغییرات اقلیمی با استفاده از نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در شرایط ترسالی، سطح آب زیرزمینی در بخش شمالی شهر بجنورد به کمتر از چهار متر می‌رسد که می‌تواند سبب بروز مشکلات جدی برای ساکنان این منطقه شود.

در حال حاضر، بهترین ابزار برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، مدل‌های جفت‌شده اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو<sup>۳</sup> (AOGCM) هستند. این مدل‌ها برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی به سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای<sup>۴</sup> (GHGs) نیاز دارند. بنابراین، در این مطالعه برای بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعه شده با در نظر گرفتن عدم قطعیت

1. Panda

2. Erturk

3. AOGCM: Atmosphere- Ocean General Circulation Model

4. Greenhouse Gases Scenarios

گتوند که متعلق به سازمان هواشناسی کشور است دوره آماری ۱۲ ساله باران دارد. ایستگاه باران‌سنج معمولی پل‌لالی نیز در سال ۱۳۶۰ تأسیس شده است و ۱۵ سال آمار باران دارد. این ایستگاه در سال ۱۳۷۶ تعطیل شده است. دو ایستگاه تبخیرسنجی گتوند و باران‌سنج سازمان هواشناسی گتوند در دشت‌های این محدوده و ایستگاه پل‌لالی در ارتفاعات این محدوده قرار گرفته‌اند [۱۰].

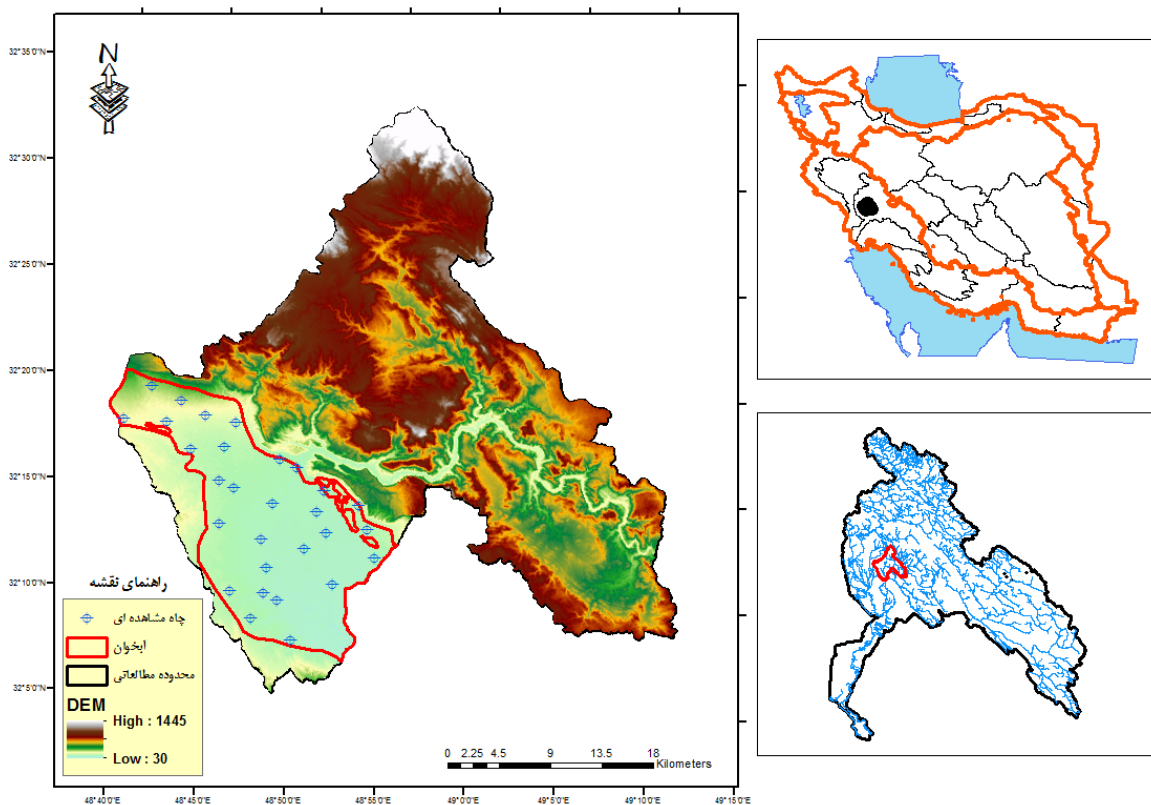
به‌منظور شبیه‌سازی آبخوان و اعمال سناریوهای تغییر اقلیم در سطوح ریسک مختلف تحقیق حاضر در سه مرحله کلی شامل تهیه مدل ریاضی سیستم آب زیرزمینی آبخوان، بررسی پدیده تغییر اقلیم در آبخوان و در نهایت شبیه‌سازی سیستم آب زیرزمینی آبخوان تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم صورت پذیرفت. خلاصه مراحل انجام کار در فلوجارت زیر (شکل ۲) ارائه شده است.

خروجی مدل‌های AOGCM، سناریوهای دما و بارش (برای دوره آتی ۲۰۱۶-۲۰۴۵) مورد نیاز مدل GMS با استفاده از ۱۰ مدل AOGCM تحت سناریوی انتشار RCP8.5 تولید و وارد مدل GMS شدند.

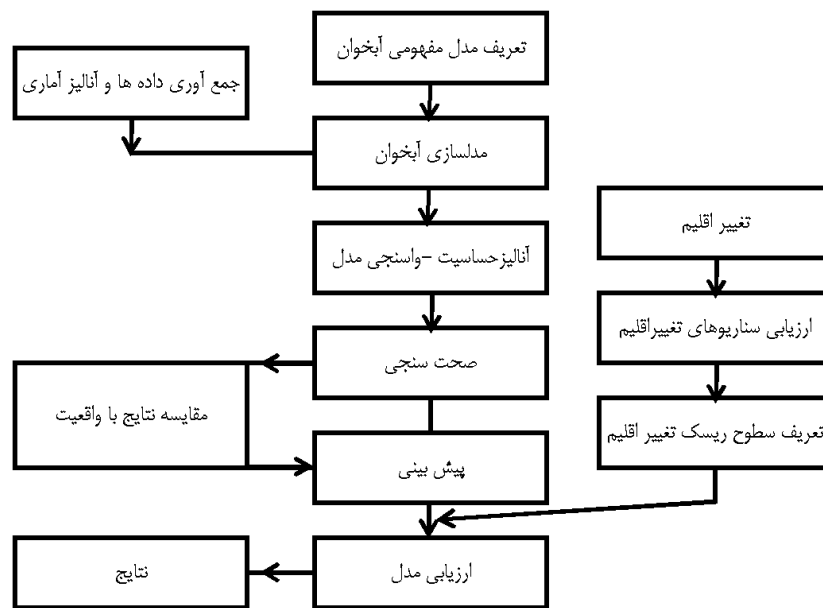
## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه شده

دشت گتوند- عقیلی با وسعت حدود ۲۳۰ کیلومترمربع در غرب شهرستان گتوند بین طول‌های جغرافیایی  $48^{\circ}34'$  تا  $49^{\circ}21'$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $32^{\circ}4'$  تا  $32^{\circ}27'$  شمالی، در شمال استان خوزستان واقع شده است. شکل ۱ موقعیت آبخوان گتوند- عقیلی را در کشور نشان می‌دهد. قدیمی‌ترین ایستگاه هواشناسی واقع در این محدوده، ایستگاه تبخیرسنجی گتوند است که در سال ۱۳۳۳ توسط وزارت نیرو تأسیس شده و ۴۴ سال آمار بارندگی، ۲۶ سال آمار تبخیر و ۳۰ سال آمار دما دارد. ایستگاه باران‌سنجی



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده



شکل ۲. مراحل انجام تحقیق

روش های تحلیلی حل می شود. در حالت ماندگار طرف راست معادلات یادشده برابر صفر خواهد بود.

مدل های عددی براساس روش های گوناگون تقریب سازی، معادلات دیفرانسیل جریان و روش های حل عددی به چند گروه تقسیم می شوند که کاربردی ترین آنها عبارت اند از: مدل های عددی تفاضل محدود و مدل های عددی عناصر محدود [۱۲].

در این طرح با استفاده از روش تفاضل محدود اقدام به شبیه سازی تراز آب زیرزمینی شد. کاربرد این روش ساده است و به راحتی می توان تغییرات مورد نیاز را در هر زمانی به مدل وارد کرد و نتایج به دست آمده از این روش دقت نسبتاً قابل قبولی دارند [۱۳].

#### مدل سازی آبخوان

نخستین گام در مدل سازی آب زیرزمینی تهیه مدل مفهومی آبخوان است که براساس مطالعات بیلان منطقه، پارامترهای تغذیه و تخلیه آبخوان وارد مدل سازی می شود. شرایط مرزی آبخوان شامل جبهه های ورودی و خروجی آبخوان، ساختار آبخوان شامل توپوگرافی، سطح آب و سنگ بستر، میزان تغذیه ناشی از نفوذ بارندگی و رواناب سطحی، تخلیه منابع آب آبخوان، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان و... پارامترهای تشکیل دهنده مدل است. پس از

#### مدل آب زیرزمینی

یکی از اهداف مهم در مدل سازی اصلاح الگو به منظور رفتار بهینه برای مدیریت سفره های آب زیرزمینی و استفاده از سناریوهای مختلف برای تصمیم گیری در شرایط مختلف تنش است. استفاده از مدل ریاضی به خصوص در حرکت املاح مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته و شبیه سازی های متعددی برای تصمیم گیری در امور منابع آب انجام شده است.

معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی معادله لاپلاس است که با توجه به شرایط جریان در دو حالت ماندگار و غیرماندگار ارائه شده است. در حالت غیرماندگار در یک محیط غیرهمسان و هنگامی که سیستم مختصات در طول جهات اصلی ناهمسان گردی جهت گیری کرده است برای شرایط محبوس عبارت است از: [۱۱]

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

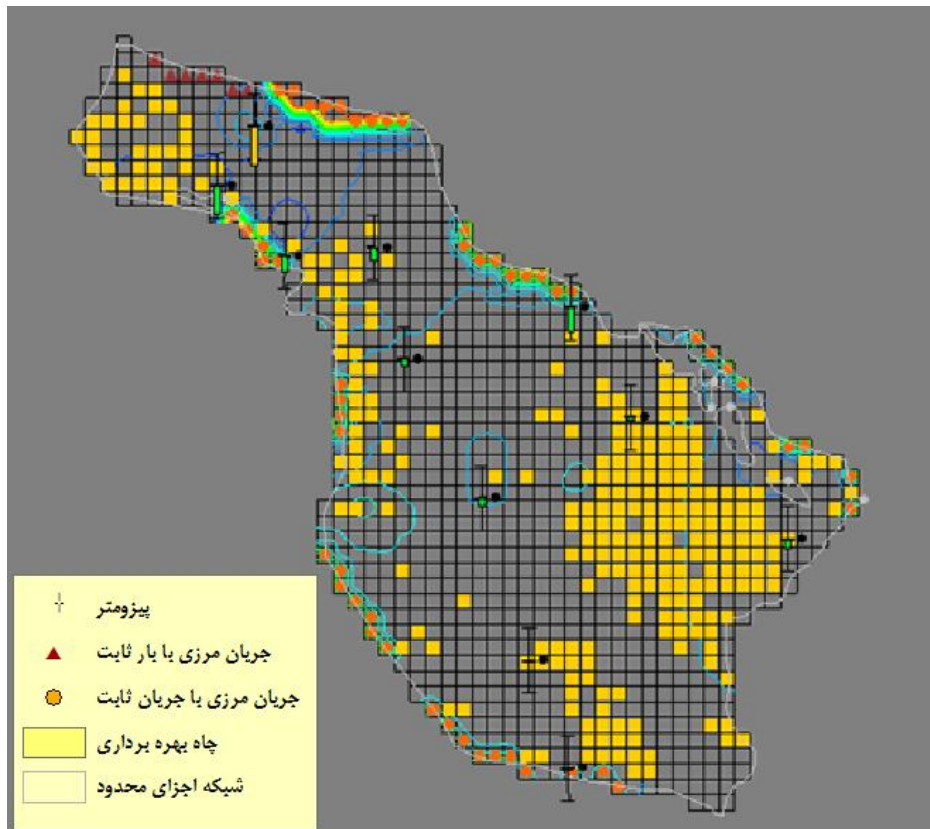
برای شرایط آبخوان آزاد:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_y}{bK} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

معادله یادشده معادله خطی بوسینسک است که برای شرایط ایزوتروپ، همسان، دوبعدی، ناپایدار، آزاد و ضخامت اشباع ثابت به کار می رود که به سهولت به وسیله

مفهومی آبخوان را نشان می‌دهد. مدل‌سازی آبخوان برای یک دوره ۱۰ ساله از مهر ۱۳۸۱ تا شهریور ۱۳۹۱ انجام گرفت. مدل ماندگار برای نخستین گام زمانی که مهر ۱۳۸۱ است با توجه به داده‌های موجود و کمترین میزان نوسان تراز آب زیرزمینی انتخاب شد.

تعریف این پارامترها، مدل مفهومی به مدل شبیه‌ساز MODFLOW در محیط رابط گرافیکی GMS تبدیل شد. برای تحلیل و آنالیز محدوده و واسنجی دقیق پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان شبیه‌سازی در دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار انجام شد. شکل ۳ نمای مدل



شکل ۳. مدل مفهومی آبخوان گتوند- عقیلی

RCP8.5 می‌شوند. در این میان، در سناریوی RCP8.5 نیروی واداشت تابشی تا انتهای قرن ۲۱ افزایش و به ۸/۵ وات بر مترمربع می‌رسد [۵]. در این مقاله برای تولید سناریوهای اقلیمی دما و بارش ماهانه در شرایط تغییر اقلیم، از خروجی ۱۰ مدل گردش عمومی BCC-CSM1, ESM-BNU, IPCC, IPSL, FIO-ESM, FGOALS-g2, CCCM-CM, CCSM4 NorESM1-M و MPI-ESM-LR, MIROC5, CM5A-LR تحت سناریوی انتشار RCP8.5 (بحرانی‌ترین سناریو از نظر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای) استفاده شد.

#### ریزمقیاس‌نمایی و تولید سناریوهای تغییر اقلیم

به‌منظور حذف اغتشاشات نامعتبر درون‌مدلی این مدل‌ها در محاسبات و تقویت میزان تغییرات اقلیمی موجود، معمولاً به جای استفاده مستقیم از داده‌های AOGCM در

#### تولید سناریوهای تغییر اقلیم

در حال حاضر، بهترین ابزار برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، مدل‌های جفت‌شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو<sup>۱</sup> (AOGCM) هستند. این مدل‌ها برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی به سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای<sup>۲</sup> (GHGs) نیاز دارند. گزارش ارزیابی پنجم IPCC از سناریوهای نماینده خط سیر غلظت<sup>۳</sup> (RCP) گازهای گلخانه‌ای استفاده می‌کند. سناریوهای جدید انتشار بر اساس سطح واداشت تابشی تا سال ۲۱۰۰ میلادی بنا نهاده شده‌اند که شامل چهار سناریوی RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 و

1. AOGCM: Atmosphere- Ocean General Circulation Model  
2. Greenhouse Gases Scenarios  
3. Representative Concentration Pathway

قطعیت مدل‌های AOGCM بررسی شد. برای تولید سناریوهای اقلیمی ماهانه دما و بارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های AOGCM به این صورت عمل شد که مقادیر  $\Delta T$  و  $\Delta P$  (روابط ۵ و ۶) برای هر مدل AOGCM برای هر ماه محاسبه شد. به بیان دیگر، برای تولید سناریوی اقلیمی در هر دوره آتی، برای هر ماه ۱۰ تا  $\Delta T$  و  $\Delta P$  محاسبه شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار Easy Fit بهترین تابع توزیع (تابع توزیع بتا) بر مقادیر  $\Delta T$  و  $\Delta P$  برازش داده شد و برای هر ماه یک تابع توزیع بتا برای  $\Delta T$  و  $\Delta P$ ‌های همان ماه حاصل شد. سپس، تابع توزیع تجمعی احتمالاتی (CDF)  $\Delta T$  و  $\Delta P$ ‌ها برای هر ماه، از تابع توزیع بتای مربوط به آن تعیین شد. در نهایت، از CDF مربوط به آن مقادیر  $\Delta T$  و  $\Delta P$  در پنج سطح احتمال ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۰/۹۰ استخراج شد. با استفاده از  $\Delta T$  و  $\Delta P$ ‌های استخراج شده در پنج سطح احتمال و روابط ۵ و ۶ سناریوهای اقلیمی دما و بارش ماهانه برای دوره آتی (در سطوح مختلف احتمالاتی) تولید شد. در مرحله بعد سری زمانی دما در سطح احتمال ۰/۹ و بارش در سطح احتمال ۰/۱ با هم ترکیب شده و سناریوی اقلیمی مورد نیاز مدل GMS در سطح ریسک ۰/۱ تولید شد. برای سناریوی اقلیمی با سطح ریسک ۰/۲۵ سری زمانی تولید شده دما در سطح احتمال ۰/۷۵ و بارش ۰/۲۵ با هم ترکیب شدند و به این ترتیب برای تولید سناریوی اقلیمی با سطح ریسک ۰/۹۰، دما در سطح احتمال ۰/۱ و بارش در سطح احتمال ۰/۹ با هم ترکیب شده و سناریوهای اقلیمی در سطوح مختلف ریسک وارد مدل GMS شدند.

### یافته‌ها

#### ۱. واسنجی و صحت‌سنجی مدل MODFLOW

آنالیز حساسیت و واسنجی دو مرحله متوالی در مدل‌سازی آب زیرزمینی است که در دو حالت ماندگار و غیرماندگار انجام می‌شود. پس از آنالیز حساسیت مدل کمی در حالت ماندگار پارامتر هدایت هیدرولیکی و در حالت غیرماندگار پارامتر آبدی و ویژه آبخوان به عنوان پارامتر حساس معرفی شد. سپس، با استفاده از روش سعی و خطا و براساس نتایج مدل‌سازی‌های قبلی واسنجی مدل انجام شد. به منظور افزایش دقت در واسنجی هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه از روش PEST نیز به منظور کاهش میزان خطای بین تراز

محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌های این داده‌ها استفاده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد بهترین طول دوره آماری برای محاسبه سیگنال‌های تغییر اقلیم ۳۰ سال است. به این منظور و با توجه به موجودیت آمار متغیرهای اقلیمی منطقه دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به عنوان دوره پایه و دوره ۲۰۱۶-۲۰۴۵ به عنوان دوره آتی در نظر گرفته شد [۱۴].

برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل AOGCM، مقادیر اختلاف دما (رابطه ۳) و «نسبت» برای بارندگی (رابطه ۴) بین میانگین دمای ۳۰ ساله در دوره آتی (۲۰۱۶-۲۰۴۵) و دوره شبیه‌سازی شده پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) توسط همان مدل برای هر سلول از شبکه محاسباتی، محاسبه می‌شود.

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{AOGCM, fut_i} - \bar{T}_{AOGCM, base_i}) \quad (3)$$

$$\Delta P_i = (\bar{P}_{AOGCM, fut_i} - \bar{P}_{AOGCM, base_i}) \quad (4)$$

در روابط یادشده  $\Delta T_i$  و  $\Delta P_i$  به ترتیب بیان‌کننده سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای میانگین بلندمدت ۳۰ ساله برای هر ماه ( $1 \leq i \leq 12$ )،  $\bar{T}_{AOGCM, fut_i}$  و  $\bar{P}_{AOGCM, fut_i}$  میانگین ۳۰ ساله دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه،  $\bar{T}_{AOGCM, base_i}$  و  $\bar{P}_{AOGCM, base_i}$  میانگین ۳۰ ساله دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هر ماه است.

ریزمقیاس کردن داده‌های اقلیمی یکی از منابع عدم قطعیت به شمار می‌آید. یکی از روش‌های ریزمقیاس کردن داده‌ها به لحاظ مکانی، روش تناسبی است. در این روش، متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط AOGCM از اطلاعات مربوط به سلولی استخراج می‌شود که منطقه مطالعه شده در آن قرار دارد (روابط ۵ و ۶).

$$T = T_{base} + \Delta T \quad (5)$$

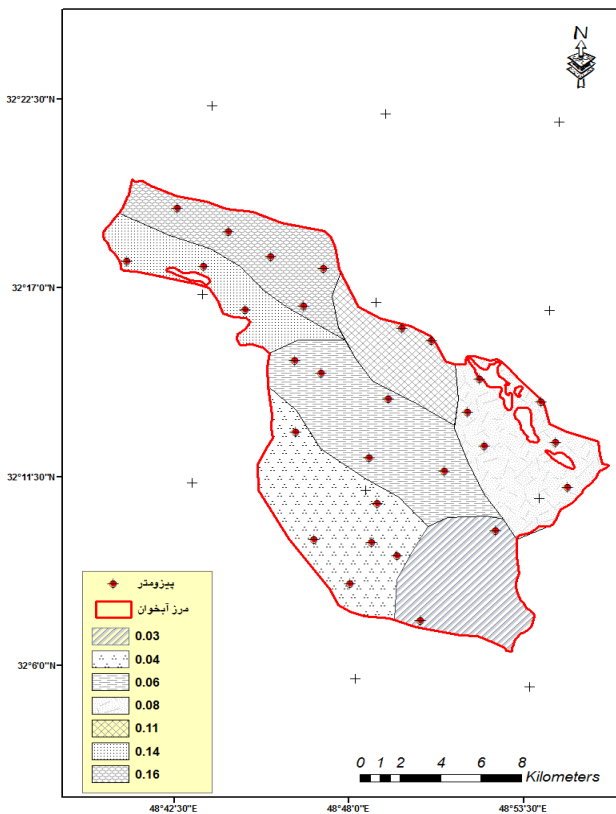
$$P = P_{base} + \Delta P \quad (6)$$

که،  $T_{base}$  دمای ماهانه مشاهداتی در دوره پایه،  $T$  دمای تولیدی از پدیده تغییر اقلیم در دوره‌های آتی و  $\Delta T$  بیان‌کننده سناریوی تغییر اقلیم دمای کوچک‌مقیاس شده هستند. برای بارندگی ( $P$ ) نیز موارد یادشده برقرار است.

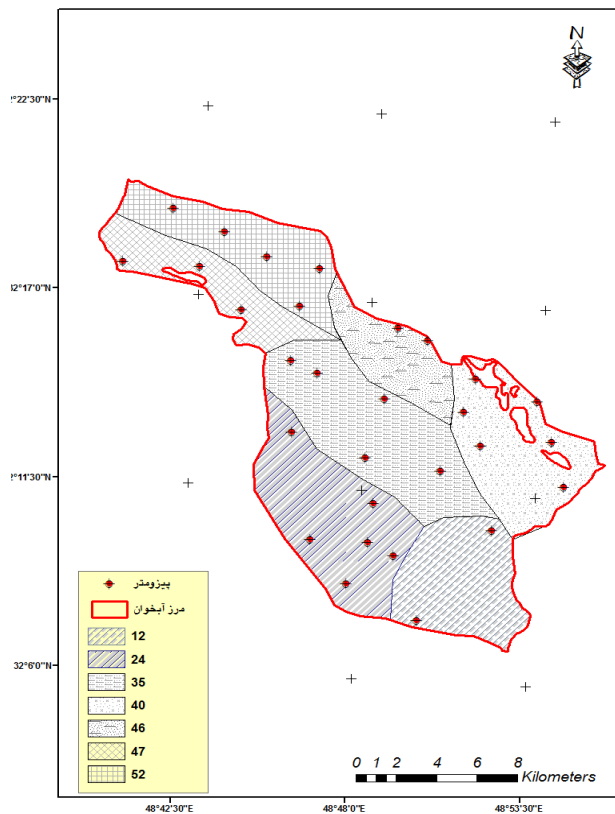
در نظر گرفتن همه منابع عدم قطعیت در مطالعات تغییر اقلیم به سادگی امکان‌پذیر نیست [۱۵]. بنابراین، در تحقیق حاضر عدم قطعیت مهم‌ترین منبع آن یعنی عدم

شد. در این مرحله، معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای مدل ماندگار ۰/۷۵۱ و برای مدل غیرماندگار ۰/۸۵۲ متر محاسبه شده است که نشان‌دهنده دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی آبخوان است. پارامترهای آماری میانگین خطا، میانگین مطلق خطا نیز در این جدول برای هر دو مدل ماندگار و غیرماندگار محاسبه شده است. میانگین خطا برابر با میانگین خطای کلیه پیژومترها است که بین تراز آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به دست می‌آید. میانگین مطلق خطا برابر با میانگین قدرمطلق خطای بین تراز آب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است. میانگین مجذور خطا برابر با میانگین مجذور اختلاف تراز آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در کلیه پیژومترهاست.

آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نیز انجام شد. شکل ۴ واسنجی نهایی هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و شکل ۵ واسنجی نهایی آبدهی ویژه در حالت غیرماندگار را در آبخوان نشان می‌دهد. یکی از معیارهای مهم برای صحت‌سنجی مدل‌سازی مقایسه اختلاف بین سطح آب مشاهده شده در پیژومترها و سطح آب برآورد شده توسط مدل است که در این مورد دقت ۹۵ درصدی به عنوان معیار، انتخاب می‌شود. به این منظور از خطای محاسباتی مدل MODFLOW در دو حالت ماندگار و غیرماندگار استفاده شد. واسنجی مدل در حالت غیرماندگار برای مدت شش سال انجام شد. به این منظور برای سنجش وضعیت مناسب واسنجی مدل، آنالیز آماری پارامترهای خطا در هر دو حالت مدل انجام و نتایج به صورت جدول ۱ استخراج



شکل ۵. آبدهی ویژه واسنجی شده



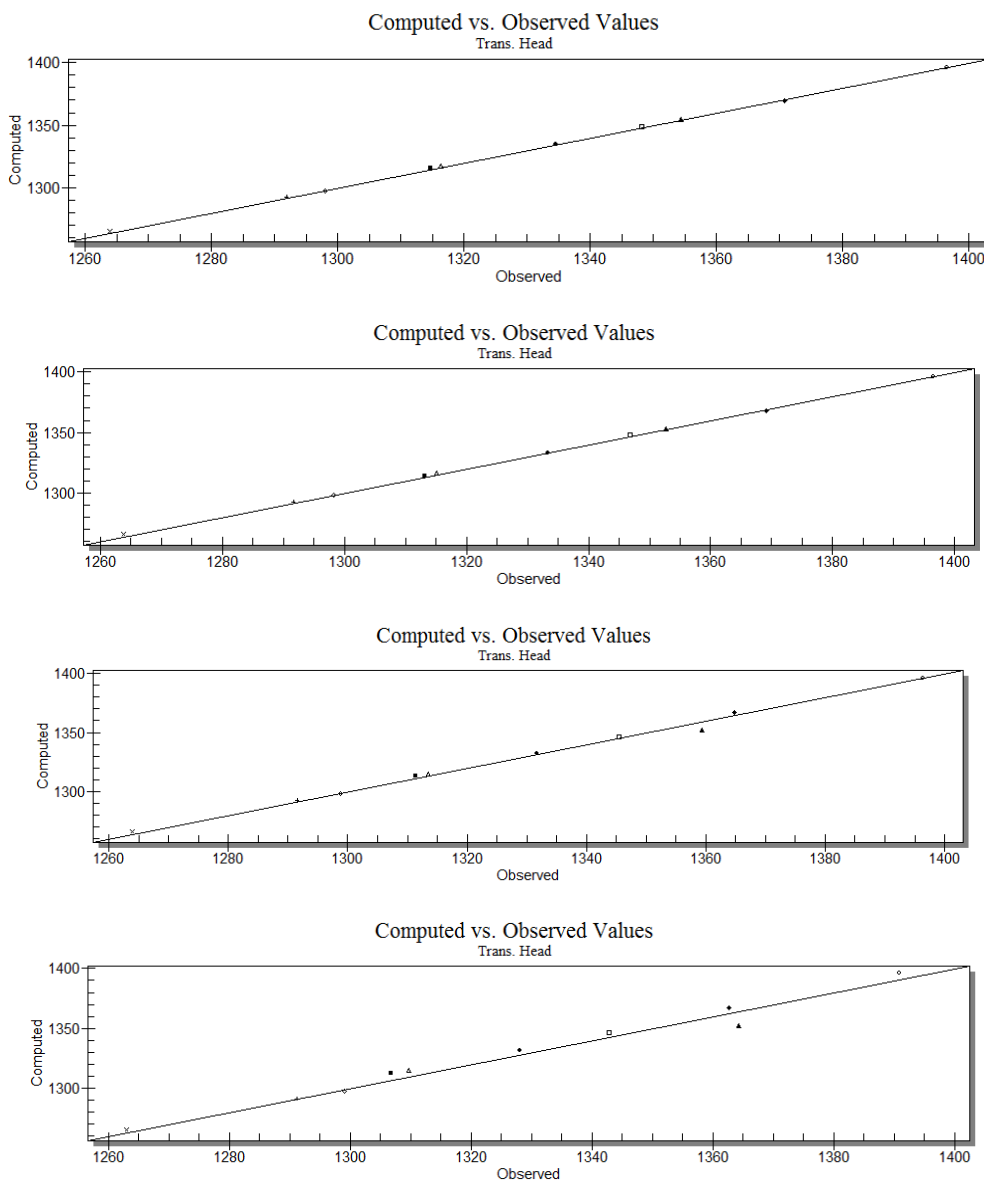
شکل ۴. هدایت هیدرولیکی واسنجی شده

جدول ۱. انواع میانگین خطای واسنجی مدل در شرایط ماندگار و غیرماندگار (بر حسب متر)

پارامتر خطا	مدل ماندگار	مدل غیرماندگار
میانگین خطا	-۰/۱۴۳	۰/۲۰۷
میانگین مطلق خطا	۰/۵۲۷	۰/۶۹۹
میانگین مجذور خطا	۰/۷۵۱	۰/۸۵۲

صحت‌سنجی مدل غیرماندگار انجام شد. شکل ۶ نتایج صحت‌سنجی که از مدل استخراج شد را نشان می‌دهد. نتایج صحت‌سنجی بیان‌کننده همبستگی زیاد بین تراز آب مشاهداتی و شبیه‌سازی مدل طی دوره صحت‌سنجی است. ضریب همبستگی بین تراز آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده طی چهار سال صحت‌سنجی به صورت جدول ۲ ارائه شده است که بیان‌کننده دقت مناسب برای پیش‌بینی مدل است.

با توجه به اینکه یکی از اهداف مهم مدل‌سازی پیش‌بینی شرایط آینده در وضعیت کمی و کیفی آبخوان است، بنابراین، صحت‌سنجی مدل برای ارتباط بین داده‌های مشاهده‌ای و ارزیابی شده مدل حائز اهمیت است. طول زمان تطابق برای صحت‌سنجی بستگی به دو عامل نوع آبخوان و رفتارهای زمانی آبخوان دارد. به منظور بررسی صحت مدل، چهار سال انتهایی مدل پس از واسنجی مدل انتخاب شد و بر این اساس



شکل ۶. نتایج صحت‌سنجی مدل غیرماندگار در چهار سال مختلف

جدول ۲. همبستگی بین تراز آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده طی دوره صحت‌سنجی

سال چهارم	سال سوم	سال دوم	سال اول	ضریب همبستگی
۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۸۸	



مقادیر  $\Delta T$  و  $\Delta P$  در پنج سطح احتمالاتی ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۰/۹۰ استخراج شد که در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند.

۲. تعیین مقادیر  $\Delta T$  و  $\Delta P$  به صورت احتمالاتی با استفاده از تابع توزیع بتای مربوط به  $\Delta T$  و  $\Delta P$ ها، تابع توزیع تجمعی احتمالاتی (CDF) متناظر با آنها برای ماه‌های مختلف به صورت جداگانه تعیین شد. سپس، از روی CDF.

جدول ۳. استخراج  $\Delta T$  در پنج سطح احتمالاتی، تحت سناریوی RCP8.5

سطوح احتمال	ماه											
	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	جون	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
۰/۱۰	۰/۷۰	۱/۰۰	۰/۸۲	۱/۱۷	۱/۲۱	۱/۴۵	۱/۲۸	۱/۳۱	۱/۱۶	۱/۱۷	۰/۹۱	۰/۲۸
۰/۲۵	۰/۸۶	۱/۱۲	۱/۰۰	۱/۴۳	۱/۵۰	۱/۷۱	۱/۴۷	۱/۴۸	۱/۳۷	۱/۳۵	۱/۰۷	۰/۲۸
۰/۵۰	۱/۰۴	۱/۲۹	۱/۲۵	۱/۸۲	۱/۹۱	۲/۱۱	۱/۷۱	۱/۷۰	۱/۶۴	۱/۵۹	۱/۲۸	۰/۳۴
۰/۷۵	۱/۲۲	۱/۴۶	۱/۵۰	۲/۲۵	۲/۳۴	۲/۵۵	۱/۹۶	۱/۹۰	۱/۹۰	۱/۸۴	۱/۵۰	۰/۵۶
۰/۹۰	۱/۳۴	۱/۵۹	۱/۷۰	۲/۶۰	۲/۶۸	۲/۹۲	۲/۱۴	۲/۰۴	۲/۰۹	۲/۰۴	۱/۶۶	۰/۹۱

جدول ۴. استخراج  $\Delta P$  در پنج سطح احتمالاتی، تحت سناریوی RCP8.5

سطوح احتمال	ماه											
	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	جون	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
۰/۱۰	۰/۶۰	۰/۸۷	۰/۶۷	۰/۸۵	۰/۶۹	۲/۲۰	۰/۹۴	۰/۴۶	۳/۵۰	۰/۸۳	۰/۹۱	۰/۹۲
۰/۲۵	۰/۷۰	۱/۰۳	۰/۷۷	۰/۹۷	۰/۸۷	۲/۸۰	۱/۶۳	۰/۷۲	۴/۲۵	۱/۰۵	۰/۹۸	۱/۱۳
۰/۵۰	۰/۸۲	۱/۲۹	۰/۹۰	۱/۱۶	۱/۱۲	۳/۶۰	۲/۶۴	۱/۰۹	۵/۷۲	۱/۳۷	۱/۰۶	۱/۴۷
۰/۷۵	۰/۹۴	۱/۶۲	۱/۰۵	۱/۳۷	۱/۴۱	۴/۱۰	۳/۷۹	۱/۴۸	۷/۲۰	۱/۷۳	۱/۱۶	۱/۸۷
۰/۹۰	۱/۰۳	۱/۹۱	۱/۱۶	۱/۵۵	۱/۶۶	۴/۹۰	۴/۷۷	۱/۷۹	۸/۵۰	۲/۰۳	۱/۲۴	۲/۲۱

استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم با سطوح ریسک مختلف به شرحی که در بخش مواد و روش‌ها یاد شد، ارزیابی شد و میزان تغذیه و تخلیه آبخوان تحت هر سناریو محاسبه شد. پس از تغییرات ایجاد شده در پارامترهای مختلف بیلان آب زیرزمینی آبخوان، مدل مفهومی دوباره اجرا و شبیه‌سازی برای دوره آبی انجام شد. نتایج استخراجی از سناریوهای تغییر اقلیم در ۱۰ سال ابتدایی نتایج مناسبی از نظر تراز آب شبیه‌سازی داد و در بیست سال بعدی دقت مدل کم بوده و بنابراین از شبیه‌سازی و نتایج آن حذف شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد سناریوهای تا سطح ریسک ۰/۷۵ (که نتایج سناریوی مربوط به ریسک ۰/۱ به عنوان نمونه در شکل ۷ ارائه شده است) سبب افت تراز آبخوان و در سناریوی سطح ریسک ۰/۹ (شکل ۸) سبب افزایش تراز آب می‌شود. شکل ۷ بیشترین میزان افت آبخوان را نشان می‌دهد که در سطح ریسک ۰/۱ رخ داده است. در این سناریو (تغییر اقلیم با سطح ریسک ۰/۱۰) آبخوان افت

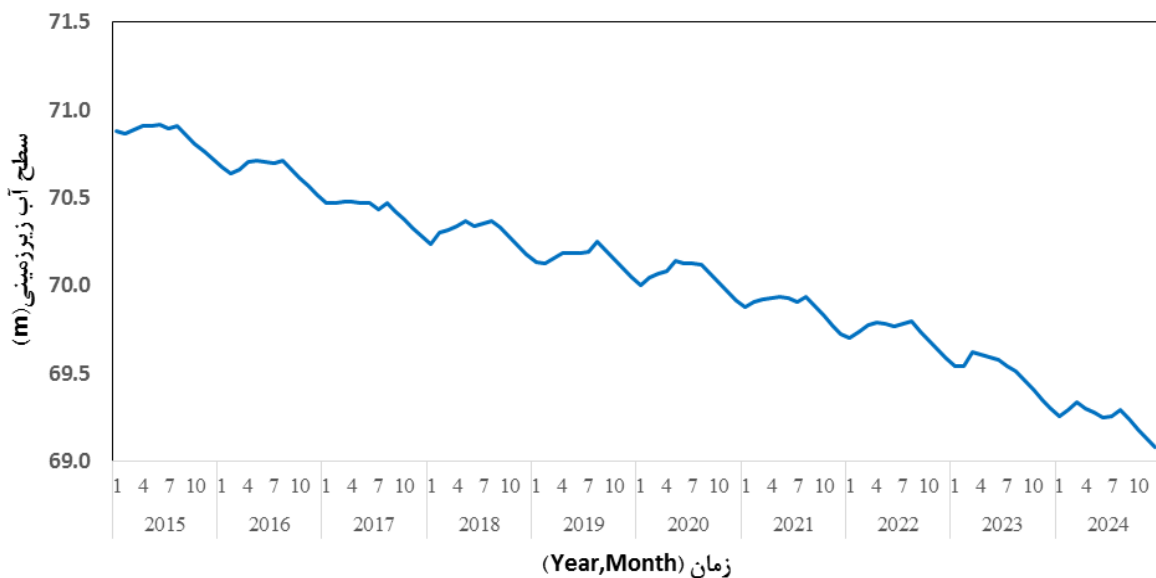
از جدول ۳ پیداست که با افزایش سطح احتمال، مقدار دما و بارش در دوره آبی نسبت به دوره پایه  $\Delta T$  و  $\Delta P$  افزایش می‌یابد مقدار  $\Delta T$  در ماه‌های گرم سال نسبت به ماه‌های سرد سال افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. کمترین افزایش دما در ماه دسامبر در سطح احتمال ۰/۱ (۰/۲۸ سانتی‌گراد) و بیشترین افزایش دما در ماه ژوئن در سطح احتمال ۰/۹ (۲/۹۲) رخ می‌دهد. درباره تغییرات  $\Delta P$  در ماه‌های مختلف باید گفت که در ماه‌های گرم سال که مقدار بارش نزدیک به صفر است مقدار  $\Delta P$  عدد زیادی نشان می‌دهد که با توجه به رابطه ۶ و ناچیز بودن بارش در این ماه‌ها، افزایش عددی میزان بارش (برحسب میلی‌متر بر ماه) در دوره آبی ناچیز خواهد بود.

۳. پیش‌بینی وضعیت آب زیرزمینی تحت شرایط سناریوهای تغییر اقلیم

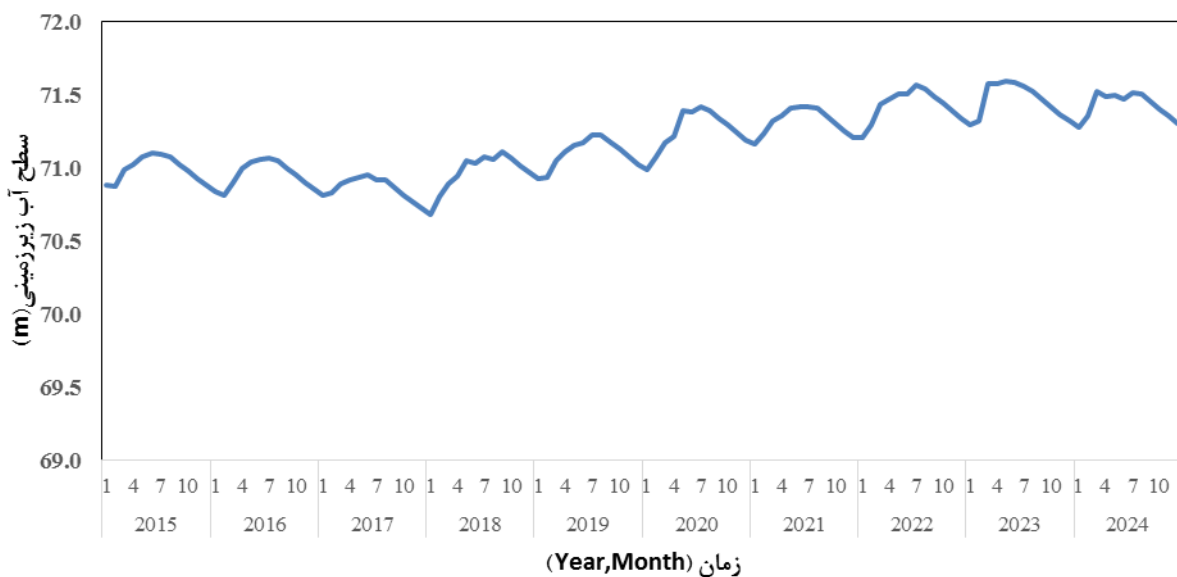
پس از صحت‌سنجی مدل پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW انجام شد. به این منظور با

صورت افزایشی خواهد بود و پس از ماه می تا انتهای سال آبی (ماه سپتامبر) سطح آب زیرزمینی کاهش خواهد یافت. طبق هیدروگرافها سناریوی نخست با افت محسوس ۱/۸ متر طی دوره آبی بیشترین میزان افت را پیش‌بینی می‌کند. در این سناریو سطح آب زیرزمینی در همه پیزومترها افت کرده است. بنابراین، این سناریو به‌عنوان وخیم‌ترین سناریو معرفی می‌شود.

محسوسی به میزان ۱/۸ متر طی ۱۰ سال آبی دارد. در شکل ۸ شبیه‌سازی آبخوان تحت شرایط تغییر اقلیم با سطح ریسک ۰/۹۰ است که آبخوان افزایش سطح آب به میزان ۰/۴۳ متر طی ۱۰ سال آبی دارد. به‌طور کلی، می‌توان گفت در همه سناریوها برای هر سال آبی در دو ماه اول پاییز (ماه‌های اکتبر و نوامبر) سطح آب کاهش یافته و پس از آن تا اواسط بهار (ماه می) روند تغییرات سطح آب به



شکل ۷. هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان در سناریوی نخست (تغییر اقلیم با سطح ریسک ۰/۱۰)



شکل ۸. هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان در سناریوی پنجم (تغییر اقلیم با سطح ریسک ۰/۹۰)

assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge university press, Cambridge. 2001; a:1-53.

- [4]. IPCC. Climate change. The science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. Houghton, J.T., Filho, L.G.M., Callander, B.A., Harris, N., Attenberg, A. and Maskell K.. Cambridge University Press, Cambridge. 2001; b:572.
- [5]. IPCC, Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014; 1-32.
- [6]. Panda D.K, Mishra A, Kumar A. Trend quantification in groundwater levels of Gujarat in western India. Hydrological Sciences Journal. 2012; 57 (7): 1325–1336.
- [7]. Erturk A, Ekdal A, Gürel M, Karakaya N, Guzel C, Gönenç E. Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed. Science of the Total Environment. 2014; 499: 437-447.
- [8]. Naderianfar M, Ansari H, Ziaie A, Davary K. Evaluating the groundwater level fluctuations under different climatic conditions in the basin Neyshabour. Irrigation & Water Engineering. 2011; 3(1): 22-37. [Persian].
- [9]. Altafi Dadgar M, Mohammadzade H, Nassery H. Simulation of bojnourd aquifer groundwater flow with emphasis on climate change using mathematical model. National Conference on Water Flow and Pollution. University of Tehran. 2012. [Persian].
- [10]. Ministry of Energy. 2014. Studies on providing balance sheet for water resources of Great Karoon Basin area, Volume VI (Reports of balance sheet studies on Aghili-Gotvand area), Consulting Engineers of Saman Waterway. 2014. [Persian].
- [11]. Shamsai A. Hydraulic flow in porous media: application of mathematical models – computer models (Volume 3). 2nd ed. Tehran: Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic); 2004. [Persian].

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیرات تغییر اقلیم بر میزان سطح آب زیرزمینی در آبخوان گتوند - عقیلی استان خوزستان بررسی شد. برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی از مدل MODFLOW در محیط GMS استفاده شده است. تحلیل‌هایی که با استفاده از شاخص‌های آماری بین سطح آب زیرزمینی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده انجام پذیرفت نشان‌دهنده دقت خوب مدل بود. برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی دما و بارش از خروجی ۱۰ مدل AOGCM تحت سناریوی انتشار RCP8.5 استفاده شد و سناریوهای اقلیمی دوره آتی در پنج سطح ریسک ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۰/۹۰ تولید شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد سناریوهای تا سطح ریسک ۰/۷۵ افت تراز آب زیرزمینی آبخوان و در سناریوی سطح ریسک ۰/۹ افزایش تراز آب زیرزمینی آبخوان پیش‌بینی می‌شود. بیشترین میزان افت آبخوان در سطح ریسک ۰/۱ و به میزان ۱/۸ متر طی ۱۰ سال آتی رخ خواهد داد. در سناریوی سطح ریسک ۰/۹۰ پیش‌بینی می‌شود که سطح آب زیرزمینی آبخوان افزایش ۰/۴۳ متر طی ۱۰ سال آتی را شاهد باشد که پیشنهاد می‌شود با توجه به مخاطرات جدی تغییر اقلیم، تصمیم‌گیری درباره مدیریت منابع آب زیرزمینی برای آینده با ریسک ۱۰ درصد صورت گیرد. همچنین، مشخص شد در همه سناریوها برای هر سال آبی در دو ماه اول پاییز (ماه‌های اکتبر و نوامبر) سطح آب کاهش یافته و پس از آن تا اواسط بهار (ماه می) روند تغییرات سطح آب به صورت افزایشی خواهد بود و پس از ماه می تا انتهای سال آبی (ماه سپتامبر) سطح آب زیرزمینی کاهش خواهد یافت.

## منابع

- [1]. Doll P, Hoffmann-Dobrev H, Portmanna F.T, Siebert S, Eickerc A, Rodell M, et al. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. Journal of Geodynamics. 2012; 59–60: 143–156.
- [2]. Bell A, Zhu T, Xie H, Ringler C. Climate-water interactions-Challenges for improved representation in integrated assessment models. Energy Economics. 2014; 46:510-521.
- [3]. IPCC. Technical summary. In: Climate change: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses, eds. Watson, R. T., Zinyowera M. C. and Moss R. H., contribution of working group to the second

- [12]. Chitsazan M, Kashkouli H. (Translation). Quantitative solutions in hydrogeology and ground water modeling. Writing Neren Kresic. 1nd ed. Ahvaz: Shahid Chamran University; 2002. [Persian].
- [13]. Pinder G.F, Cooper H.H. A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front. *Wat. Resour. Res.* 1970; 6(3): 875-882.
- [14]. Delghandi M. Risk assessment of climate change impact on wheat yield and provide solutions to its compatibility (Case Study: Southern Khuzestan). Thesis Ph.D. Shahid Chamran University of Ahvaz. Iran. 2012. [Persian].
- [15]. Ruiz-Ramos M, Minguez MI. Evaluating uncertainty in climate change impacts on crop productivity in the Iberian Peninsula. *Climate Research.* 2010; 44: 69-82.