

کلید واژه‌ها: آب زیرزمینی، آینده‌نگری، تغییر اقلیم، مدل‌سازی، Lars-WG.

مقدمه

بر اساس گزارشات هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC^۱)، نوسانات و تنش‌های اقلیمی، واقعیتی در حال وقوع می‌باشد و محدوده تاثیرات آن، در مقیاس جهانی خواهد بود [۲۲]. بررسی‌ها نشان می‌دهد، تا پایان سال ۲۱۰۰، این تغییرات ادامه خواهد داشت [۲۵، ۱۷]. از جمله مناطقی که به‌صورت ویژه تحت تاثیر اثر نامطلوب تغییر اقلیم قرار دارد، مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان هستند [۲۰]. با توجه به این مساله که مهم‌ترین دغدغه مدیران و برنامه‌ریزان در آینده، کمیت و کیفیت آب می‌باشد [۷]. مدیران مسئول در زمینه منابع آب، برای ساماندهی و یافتن راه‌های مقابله با این بحران بایستی تاثیر تغییر اقلیم را بر منابع آب در دسترس و میزان تقاضای آب مورد بررسی قرار دهند و تا این روابط شناخته نشود، نمی‌توان برای آینده، برنامه جامعی در نظر گرفت [۳۲]. در طول ۵۰ سال گذشته، آب‌های زیرزمینی نقش بسیار حیاتی در توسعه جوامع انسانی در سراسر دنیا داشته‌اند [۲]. بررسی‌ها نشان می‌دهد در حال حاضر، بیش از ۹۸ درصد آب شیرین مورد نیاز انسان‌ها از منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود [۳۰]. در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، منابع آب زیرزمینی به‌عنوان اصلی‌ترین منبع آبی تضمین‌گر ادامه حیات اکوسیستم‌های طبیعی و انسان‌ساز می‌باشند. هجوم بخش‌های در حال توسعه به سمت آبخوان‌ها، این منابع عظیم را چه از نظر پایداری و چه از نظر کیفی با تهدیداتی مواجه نموده است. به‌طوری‌که بررسی وضعیت سطح آب‌های زیرزمینی در بسیاری از نقاط جهان بیان‌گر روند نزولی می‌باشد [۱۹]. هرچند بخش مهمی از این وضعیت مربوط به فعالیت‌های انسانی و برداشت‌های بی‌رویه از آبخوان‌ها می‌باشد، اما در این میان تغییرات اقلیمی نیز بی‌تاثیر نبوده و از طریق تغییر در میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی، باعث کاهش سطح سفره‌ها شده است. متأسفانه علی‌رغم وفور مطالعات انجام شده در زمینه بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی، تاثیر این پدیده بر سفره‌های آب زیرزمینی کم‌تر بررسی شده است [۲۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶، ۱۱]. بخش مهمی از این وضعیت به دلیل مقاومت آب‌های زیرزمینی به نوسانات آب و هوایی و تاخیر در پاسخ‌دهی آب‌های زیرزمینی به این نوسانات می‌باشد [۱۷].

پیش‌بینی تغییرات سطح آبخوان زیرزمینی دشت یزد- اردکان با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و مدل تجزیه رگرسیون چندگانه خطی هیدروگراف آبخوان

فاطمه برزگری بنادکوکي^۱

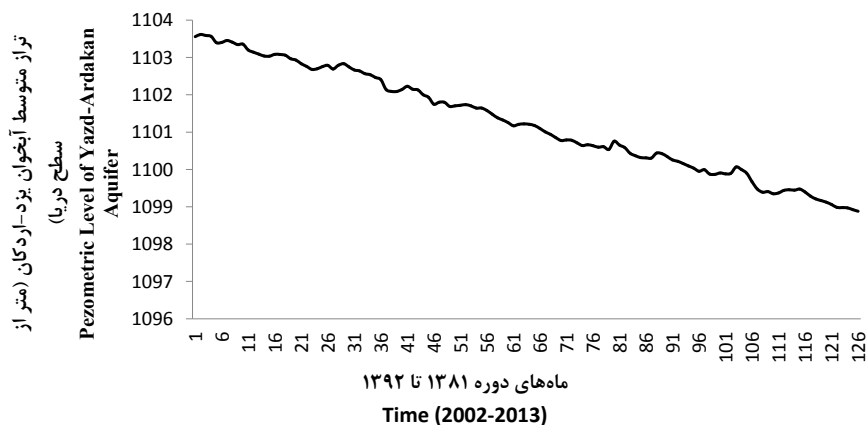
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰

چکیده

در طول قرن‌های اخیر، منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع تامین‌کننده آب مورد نیاز جوامع انسانی به‌شمار می‌آیند. متأسفانه استحصال بی‌رویه آب از این منابع، در بسیاری از مناطق باعث سیر نزولی سطح آب شده است و ادامه این روند، موجب تهدید جدی برای اکوسیستم و جوامع انسانی موجود در منطقه می‌شود. دشت یزد- اردکان، یکی از کانون‌های بحرانی از نظر روند نزولی آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود. در تحقیق حاضر آینده‌نگری سطح آبخوان اصلی یزد- اردکان، از نظر تغییر اقلیم و برداشت‌های انسانی برای دوره ۲۰۳۴-۲۰۱۶ انجام شد. به‌منظور بررسی تغییر اقلیم در منطقه مطالعاتی، از سناریوهای مدل HadCM3 و نرم‌افزار Lars-WG استفاده شد. مدل‌سازی سطح آبخوان نیز، با متغیرهای اقلیمی و روند افت قبلی سفره، توسط انواع شبکه عصبی و مدل تجزیه رگرسیون چندگانه خطی هیدروگراف آبخوان (HARTT) انجام شد. صحت‌سنجی مدل‌های به‌کار رفته نشان داد، مدل HARTT توانایی مناسبی در مدل‌سازی و پیش‌بینی نوسانات آبخوان دارد. به‌کارگیری این مدل در آینده‌نگری آبخوان نشان داد، در صورت ادامه روند فعلی برداشت بی‌رویه از ذخیره آبخوان، تا پایان سال ۲۰۳۳، افت نه متری سطح آبخوان را خواهیم داشت. ادامه این وضعیت، تخریب جدی ذخایر زیرزمینی را از نظر کمی و کیفی دربر خواهد داشت. لذا با توجه به وضعیت نامناسب اقلیمی و منابع آب بحرانی در منطقه، پیشنهاد می‌شود دولت‌مردان و تصمیم‌گیران، در تدوین چشم‌اندازهای آتی منطقه، این مساله را در نظر داشته باشند.

2- Intergovernmental Panel on Climate Change

۱- استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه پیام نور، fa_barzegar@yahoo.com



شکل ۱- هیدروگراف واحد آبخوان یزد-اردکان.
Fig. 1. Unit hydrograph of Yazd-Ardakan aquifer.

الزام انتقال بین حوضه‌ای آب در سال‌های اخیر شده است. تسکینی که دلیل مناقشات بین حوضه‌ای پیش آمده، درمان قطعی نمی‌باشد. بررسی سندهای تدوین شده چشم‌انداز توسعه استان، در افق‌های مختلف، بیان‌گر افزایش قابل توجه نیاز به آب در آینده می‌باشد. از آنجایی که مهم‌ترین منبع تامین آب در این منطقه، آبخوان زیرزمینی می‌باشد و در حال حاضر استحصال بی‌رویه و رقابت گونه آب از این آبخوان، سبب افت روزافزون سطح آب شده است، تحقیق حاضر، ضرورتی در راستای ایجاد چشم‌انداز آینده آبخوان خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در تحقیق حاضر، محدوده حوزه آبخیز دشت یزد-اردکان با توجه به وضعیت بحرانی منابع آبی و وجود حساسیت‌های اجتماعی، سیاسی و منطقه‌ای به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. افزایش جمعیت چه از نظر مولید و چه از نظر مهاجران، توسعه صنعتی چشم‌گیر و اقلیم خشک از جمله عواملی است که باعث افت قابل توجه آبخوان این محدوده شده است. به‌طوری‌که بررسی منابع متنوع مطالعاتی در بخش آب و بازمینی و به‌هنگام‌سازی آن‌ها با استفاده از داده‌های وزارت نیرو، نشان می‌دهد که مجموعه آبخوان‌های فرعی و آبخوان اصلی در منطقه مورد مطالعه، در سال ۱۳۸۸، دارای بیش از ۷۱ میلیون متر مکعب کسری ذخائر آب بوده‌اند [۳۳]. بررسی هیدروگراف واحد آبخوان، بیان‌گر برداشت بیش از توان از آب‌های زیرزمینی می‌باشد که این امر منجر به ایجاد افت متوسط سالانه ۰/۵۸ متری آبخوان زیرزمینی در طول دهه گذشته شده است، البته اخیراً این روند افزایش یافته و به افت سالانه بیش از یک متر رسیده است (شکل ۱). مدیریت بحران، بهترین گزینه برای حل مساله بحران آب و جلوگیری از تخریب کمی و کیفی آبخوان زیرزمینی می‌باشد. چنانچه شناخت پتانسیل منابع آبی، در مقیاس سطح حوزه آبخیز انجام پذیرد، می‌تواند گام موثری در راستای مدیریت مناسب منابع، حل مسائل و مناقشات کمی، زیست‌محیطی و رسیدن به اهداف اقتصادی رضایت‌بخش باشد.

از بین متغیرهای مختلف چرخه هیدرولوژیکی، میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی، نقش مهمی در تعیین قابلیت بهره‌برداری از آب‌ها و پایداری زیست‌محیطی آبخوان‌ها دارد [۲۸، ۱۱]. تغییر در میزان، توزیع و نوع بارندگی می‌تواند باعث بروز نوساناتی معنادار در الگوی تغذیه آب‌های زیرزمینی شود [۲۱]. برای حفظ و تداوم این منابع، باید مدیریت پایدار منابع آبی اعمال شود به‌طوری‌که ضمن تضمین دوام منابع مذکور برای سال‌های آتی، اثرات ناخواسته زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی آن‌ها به حداقل برسد [۳].

برای بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی، باید نوسانات آبخوان از نظر تغذیه و تخلیه در یک دوره آماری معنادار، مورد بررسی قرار بگیرد. بسیاری از مطالعات انجام شده در این زمینه فقط به بررسی مساله تغییر اقلیم پرداخته‌اند [۳۱، ۱۷، ۱۳] و سایر موارد نظیر فعالیت‌های انسانی، تغییر کاربری و تغییر الگوی پمپاژ را در نظر نگرفته‌اند [۳۱]. در حالی‌که برای دست یافتن به چشم‌اندازی مناسب در مورد تاثیرات توأم این عوامل بر سفره‌های آب زیرزمینی، لازم است که این عوامل از طریق مدل‌های مناسب، مدل‌سازی و به‌صورت تجمیع، آینده‌نگری نوسانات سفره‌ها در نظر گرفته شوند. روش تجزیه رگرسیون چندگانه خطی هیدروگراف آبخوان (HARTT) که اولین بار توسط فردوسیان و همکاران در سال ۲۰۰۱ ارائه شد، در مطالعات متعددی به‌منظور برآورد تاثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر نوسانات آبخوان‌ها، مورد استفاده قرار گرفته است [۳۵، ۲۴، ۱۵]. نتایج مطالعات انجام شده، توانایی مناسب این روش در مدل‌سازی نوسانات منابع آب زیرزمینی را تأیید می‌کند.

حوزه آبخیز دشت یزد-اردکان، از جمله مناطق استراتژیک و بحرانی می‌باشد که به‌رغم نداشتن پتانسیل توسعه از نظر شرایط اقلیمی و منابع طبیعی، روند توسعه قابل توجهی داشته است. به‌طوری‌که در بین استان‌های مختلف کشور، در رتبه چهارم جذب مهاجر قرار می‌گیرد. آنچه چنین توسعه را محقق ساخته است، رشد قابل ملاحظه بخش صنعتی می‌باشد [۳۴]. چنین روندی، باعث

1- Hydrograph Analysis and Rainfall Time Trends

[۱۴] در استرالیا به کار گرفته شد. اساس روش مذکور بر یافتن رابطه‌ای معنادار بین نوسانات تراز آب در یک پیژومتر و متغیر بارش در نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی اطراف آن پیژومتر می‌باشد [۱۴]. البته استحصال آب از آبخوان نیز به صورت تجمیع در مدل مذکور دیده می‌شود.

بعد از تصحیح داده‌های بارش، ابتدا مقادیر تجمعی اختلاف بارندگی هر ماه با متوسط بارندگی ماهانه ایستگاه مورد نظر، محاسبه می‌شود و تحت عنوان شاخص باقیمانده تجمعی بارش سالانه (AARR¹) به مدل معرفی شد (رابطه ۲). سپس مدل رگرسیونی مناسب بین نوسانات تراز پیژومتر و شاخص مذکور (AARR) برازش داده شد. برای هر بار برازش، تاخیرهای متفاوتی در داده‌های تراز آبخوان در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. البته در مطالعه حاضر، به جای داده‌های یک پیژومتر، از داده‌های متوسط وزنی نوسانات تراز آبخوان استفاده شد. لازم به ذکر است که برای اولین بار از چنین جایگزینی در مدل HARTT استفاده شده است.

$$AARR = \sum_{i=1}^t \left(M_j - \frac{A}{12} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، M_j میانگین بارش j امین ماه سال، t زمان به ماه از شروع دوره آماری و A میانگین بارندگی سالانه ایستگاه مورد نظر می‌باشد [۱۴].

برای مدل‌سازی مناسب متغیرهای مورد بررسی، ابتدا داده‌ها به دو گروه تقسیم شدند. به این ترتیب که از ۷۰ درصد داده‌ها برای ساخت مدل استفاده شد و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای صحت‌سنجی مدل ساخته شده به کار رفت. از نتایج مدل‌سازی مذکور برای پیش‌بینی میزان تغذیه آبخوان یا به عبارتی میزان آب قابل برداشت آبخوان در سال‌های آتی استفاده شد.

آینده‌نگری منطقه مورد مطالعه

آینده‌نگری منطقه مورد مطالعه از نظر متغیر اقلیمی بارش و نیز نوسانات تراز آبخوان، مورد بررسی قرار گرفت.

۱- آینده‌نگری اقلیمی

از آنجایی که عمده بارش‌های تغذیه‌کننده آبخوان مورد مطالعه، در مناطق کوهستانی (عمدتاً شیرکوه) صورت می‌گیرد، لذا به منظور آینده‌نگری اقلیمی، از بارندگی مربوط به این بخش، تحت سناریوهای اقلیمی متداول استفاده شد. برای انجام این مرحله، مدل گردش عمومی جو (HadCM 3) و سناریوهای $A_{1, AB, BI}$ در قالب نرم‌افزار Lars-WG به کار گرفته شد.

مدل Lars-WG

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش شامل مقادیر روزانه بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعات آفتابی بودند که در قالب مدل Lars-WG مورد بررسی قرار گرفتند.

LARS-WG یکی از مشهورترین الگوهای مولد داده‌های تصادفی وضع هواست که برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های

بررسی تغییرات سطح آبخوان زیرزمینی در اثر تغییر اقلیم و عوامل انسانی

به منظور برآورد تاثیر میزان بارندگی بر تراز آبخوان دشت یزد- اردکان، از میانگین وزنی متغیرهای اقلیمی حوزه آبخیز و میانگین وزنی نوسانات سطح آبخوان، در مدل‌سازی استفاده شد. به این صورت که ابتدا با استفاده از موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی، نرم‌افزار Arc GIS و روش Thiessen، محدوده تحت تاثیر (وزن متوسط) هر ایستگاه هواشناسی محاسبه شد. سپس میانگین وزنی ماهانه متغیرهای اقلیمی شامل دما و بارش، برای دوره زمانی ده ساله، در محدوده مورد نظر به دست آمد.

در مرحله بعد، به منظور برآورد متوسط نوسانات سطح آبخوان یزد- اردکان، مانند مراحل فوق، روش Thiessen برای ۵۹ پیژومتر موجود در آبخوان به کار گرفته شد و داده‌های متوسط تراز آب زیرزمینی در گام‌های زمانی ماهانه برای دوره ده ساله به دست آمد.

مدل‌سازی نوسانات آبخوان یزد- اردکان

به منظور مدل‌سازی نوسانات سطح آبخوان زیرزمینی، از روش‌های شبکه عصبی و روش HARTT استفاده شد.

۱- شبکه عصبی

جهت به کارگیری شبکه عصبی در مدل‌سازی نوسانات آبخوان زیرزمینی، از متوسط وزنی متغیرهای اقلیمی، شامل بارش و دما و متوسط وزنی نوسانات سطح آبخوان زیرزمینی، در گام‌های زمانی ماهانه در یک دوره ۱۰ ساله استفاده شد. شبکه عصبی انتخابی به صورت پرسپترون چندلایه با الگوریتم لوبنبرگ-مارکواریت بود که در محیط نرم‌افزار MATLAB 14 کدنویسی شد.

از آنجایی که سایر عوامل محیطی نظیر بهره‌برداری‌های انسانی نیز در نوسانات سطح آبخوان موثرند. برای مدل‌سازی نوسانات آبخوان با شبکه عصبی، حالت‌های مختلف زیر در نظر گرفته شد.

۱- استفاده از داده‌های آبخوان با حذف روند، همراه با متغیرهای اقلیمی بارش و دما.

۲- استفاده از داده‌های آبخوان با حذف روند، همراه با متغیر اقلیمی بارش.

۳- استفاده از داده‌های آبخوان به صورت عادی و بدون حذف روند، همراه با متغیرهای اقلیمی بارش و دما.

۴- در حالت سوم، علاوه بر متغیرهای اقلیمی، سایر عوامل محیطی موثر در نوسانات تراز آبخوان (برداشت‌های انسانی)، نیز در نظر گرفته شده است.

برای حذف روند داده‌های تراز آبخوان، از رابطه (۱) استفاده شد.

$$\hat{x} = \frac{x_i - \bar{x}}{SD} \quad (1)$$

در این رابطه، \hat{x} داده‌های نرمال شده، \bar{x} میانگین داده‌ها، x_i داده واقعی و انحراف معیار داده‌ها می‌باشد.

۲- مدل HARTT

این روش اولین بار در سال ۲۰۰۱، توسط فردوسیپان و همکاران

تفاوت‌های آماری قابل توجهی بین این دو گروه از داده‌ها وجود دارد یا نه، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

۳. تولید داده: در این جا داده‌های آب و هوایی مصنوعی با استفاده از فایل‌های به‌دست آمده از داده‌های آب و هوایی دوره دیده‌بانی شده، تولید می‌شوند که دارای خصوصیات آماری مشابه با دوره دیده‌بانی می‌باشند.

شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی دوره گذشته توسط مدل به‌منظور اجرای مدل، مقادیر روزانه بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعات آفتابی مربوط به سال‌های آماری ذکر شده در جدول (۲) به‌عنوان دوره اقلیم پایه به مدل معرفی شدند. سپس با استفاده از سناریوهای ذکر شده در جدول (۱) شبیه‌سازی اقلیم برای دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ میلادی صورت گرفت. به‌منظور تحلیل بهتر نتایج، میانگین متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده برای دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ میلادی به ازاء ماه‌های مختلف سال محاسبه و نمودارهای مربوطه ترسیم و با دوره دیده‌بانی مقایسه شد.

صحت‌سنجی مدل Lars-WG

در این تحقیق به‌منظور ریز مقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو، از مدل HadCM3 و سناریوهای A2 و B10 در AIB در نرم‌افزار Lars-WG استفاده شد. صحت‌سنجی مقادیر شبیه‌سازی شده مدل، با استفاده از متغیرهای آماری شامل اربیبی، Value و T Student انجام شد.

۲- انتخاب مدل مناسب جهت پیش‌بینی نوسانات آبخوان زیرزمینی در اثر تغییر اقلیم و عوامل انسانی

پس از صحت‌سنجی و مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف شبکه عصبی، با استفاده از شاخص‌های اعتبارسنجی و ضریب رگرسیون بین داده‌های برآوردی مدل و داده‌های واقعی، بهترین عملکرد شبکه عصبی، انتخاب شد. سپس با استفاده از شاخص ضریب همبستگی، عملکرد مدل شبکه عصبی منتخب و مدل HARTT مورد مقایسه و ارزیابی با داده‌های مشاهداتی قرار گرفت و در نهایت بهترین مدل انتخاب شد. سپس با بهره‌گیری از مدل منتخب و نیز داده‌های اقلیمی پیش‌بینی شده برای سال‌های آتی، تغییرات سطح آبخوان در آینده شبیه‌سازی شد.

نتایج

بررسی تغییر اقلیم بر منطقه مطالعاتی نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل Lars-WG با استفاده از متغیرهای آماری مذکور، در جدول (۱) ارائه شده است.

سطح معنی‌داری انتخابی برای متغیرهای آماری جدول (۱) سطح اطمینان درصد می‌باشد. همان‌طور که از جدول مذکور استنباط می‌شود، متغیرهای بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه به‌خوبی شبیه‌سازی شده است. مدل مذکور، ضعف اندکی در شبیه‌سازی تابش در این ایستگاه (ده بالا) دارد، منتهی از آن‌جایی که مبنای کار این مطالعه، بیش‌تر بر بررسی بارش استوار بوده، مشکل شبیه‌سازی

بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیمی پایه و آینده به‌کار می‌رود. مبنای این الگو برای الگوسازی طول دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش، توزیع نیمه‌تجربی است. در توزیع نیمه‌تجربی (رابطه ۳)، فاصله‌ها به‌طور مساوی بین مقادیر حداکثر و حداقل سری زمانی ماهانه تقسیم می‌شوند [۵] و [۶].

$$EMP = \{a_0, a_i, h_i \mid i=0,1,2,\dots,10\} \quad (3)$$

EMP یک بافت‌نگار با ۱۰ طبقه به‌صورت $[a_{i-1}, a_i]$ با فرض $i=0,1,2,\dots,10$ فراوانی (تعداد بارش) در طبقه a_i است. سری‌های فوریه درجه حرارت را در این الگو تخمین می‌زنند. درجه حرارت‌های کمینه و یا بیشینه روزانه به‌صورت فرآیندهایی تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز مورد نظر هستند، الگوسازی می‌شوند. سری فوریه مرتبه سوم برای شبیه‌سازی میانگین و انحراف معیار درجه حرارت فصلی به‌کار می‌رود. رفتار حاکم بر مقادیر مانده‌ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار دیده‌بانی شده به‌دست می‌آید، از طریق تحلیل خودهمبستگی زمانی داده‌های کمینه و بیشینه حاصل می‌شود [۶].

علاوه بر سناریوی تدوین شده برای هر شبکه محاسباتی، برای اجرای الگو LARS-WG به فایل مشخصه رفتار اقلیم گذشته ایستگاه‌های واقع در داخل آن شبکه نیاز می‌باشد. سپس این الگو با دریافت فایل محتوی رفتار اقلیم گذشته ایستگاه و پوشه سناریوی تولید داده، مقادیر روزانه دمای کمینه، بیشینه، بارش و تابش روزانه را در آینده محاسبه می‌کند. مکانیزم عمل الگو به این‌صورت است که مدل در ابتدا با استفاده از سناریوی تولید داده ماهانه که در برگرفته رفتار اقلیم پایه می‌باشد، تمامی داده‌های ماهانه را مطابق رابطه (۴) تنظیم می‌کند [۱، ۴، ۶].

$$F_{fut} = F_{obs} + (F_{GCM}^{fut} - F_{GCM}^{base}) \quad (4)$$

در رابطه (۲)، F_{obs} ، F_{fut} ، F_{GCM}^{base} و F_{GCM}^{fut} به‌ترتیب نشان‌دهنده متغیر هواشناسی شبیه‌سازی شده بر روی ایستگاه هواشناسی، متغیر هواشناسی دیده‌بانی شده در همان ایستگاه، متغیر هواشناسی شبیه‌سازی شده بر شبکه الگو در دوره آینده و متغیر هواشناسی مدل شده بر شبکه مدل در دوره گذشته می‌باشند. سپس با حفظ میانگین، انحراف معیار آن‌ها مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱، ۴، ۶].

$$STD = \frac{STD_{base}^{obs}}{STD_{base}^{GCM}} \times STD_{fut}^{GCM} \quad (5)$$

خلاصه‌ای از فرآیند مدل LARS-WG

در این مدل فرآیند تولید داده‌های مصنوعی آب و هوایی در سه بخش انجام می‌گیرد [۵].

۱. واسنجی مدل: در این بخش داده‌های آب و هوایی دیده‌بانی شده برای تعیین خصوصیات آماری تحلیل می‌شوند. این اطلاعات در دو فایل مجزا ذخیره می‌شوند.

۲. صحت‌سنجی مدل: در این قسمت خصوصیات آماری داده‌های دیده‌بانی و مصنوعی تولید شده توسط مدل برای تعیین این‌که آیا

جدول ۱- نتایج صحت‌سنجی مدل Lars-WG با استفاده از متغیرهای آماری*
Table -1 Results of the LARS model validation using statistical parameters*.

متغیر	variable	آزمون آماری	Test Statistical	مقدار Value
		اریبی	Biass	-2.215
بارش	Precipitation	تی استیودنت	Student T	<u>-1.517</u>
		معناداری پی	value P	<u>0.155</u>
		اریبی	Biass	0.076
دمای بیشینه	Maximum Temperature	تی استیودنت	Student T	<u>1.031</u>
		معناداری پی	value P	<u>0.323</u>
		اریبی	Biass	0.056
دمای کمینه	Minimum Temperature	تی استیودنت	Student T	<u>0.702</u>
		معناداری پی	value P	<u>0.496</u>
		اریبی	Biass	0.094
تابش	Radiation	تی استیودنت	Student T	-2.947
		معناداری پی	value P	0.012

* علامت _ به معنای عدم معنی‌داری متغیرها می‌باشد.

* Sign _ indicates insignificance variables.

مدل‌سازی نوسانات آبخوان یزد-اردکان

۱- شبکه عصبی

نتایج حاصل از به‌کارگیری شبکه عصبی در مدل‌سازی نوسانات آبخوان یزد-اردکان، در حالت‌های مختلف در شکل (۳)، ارائه شده است.

در شکل (۳)، نقاط نمایش داده شده، مربوط به نوسانات واقعی تراز آبخوان و خط برازش داده شده، مربوط به مدل‌سازی آبخوان با شبکه عصبی می‌باشد. چنان‌چه از شکل (۳) پیداست، مدل a، یعنی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با داده‌های تراز آب زیرزمینی، بارش و دما، نسبت به سایرین دارای توانایی مناسب‌تری در برآورد تراز آب زیرزمینی می‌باشد. در واقع استفاده از داده‌های نرمال شده آب زیرزمینی با حذف روند، تاثیری در بهبود مدل شبکه عصبی نداشت.

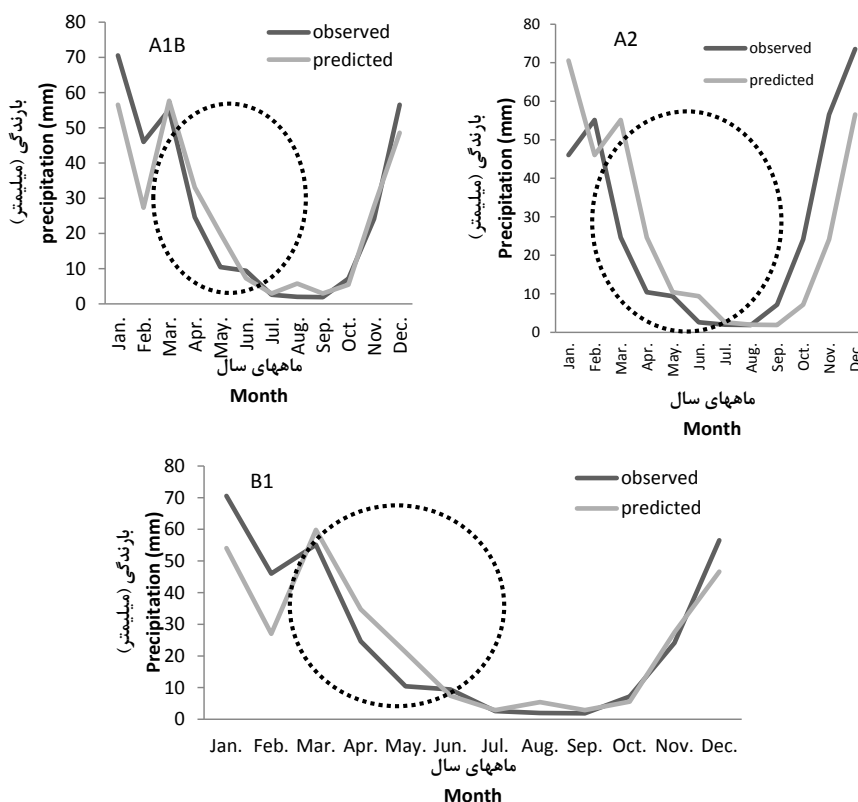
۲- مدل HARTT

نتایج حاصل از مدل‌سازی تاثیرپذیری تغذیه آبخوان زیرزمینی از متغیر بارندگی با استفاده از مدل HARTT نشان داد بهترین ارتباط بین سری‌های مذکور، هنگام ایجاد تاخیر ۶۰ ماهه در متغیر مربوط به بارندگی ماهانه (AARR) ایجاد می‌شود. نتایج حاصل از این برازش در شکل (۴) و جدول (۲) ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل (۴) و جدول (۲) پیداست، مدل HARTT در مقایسه با شبکه عصبی، ارزیابی مناسب‌تری از تاثیر بارش بر آب زیرزمینی داشته است. بر اساس جدول (۲) می‌توان گفت،

تابش قابل اغماض می‌باشد. توانایی مدل Lars-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی قبلاً در مطالعات افرادی نظیر سمونوف و همکاران [۲۷]، ماوروماتیس و هانسن [۲۳]، سمونوف و بارو [۲۶]، بابائیان و همکاران [۴]، بابائیان و همکاران [۶]، بابائیان و نجفی نیک [۵]، دوستی و همکاران [۸] و روشن و همکاران [۱۰] تأیید شده است. نتایج مربوط به شبیه‌سازی بارش ایستگاه مطالعاتی برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ توسط سناریوهای مختلف مدل HadCM3 در شکل (۲) ارائه شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲) می‌توان گفت، بارش شبیه‌سازی شده ایستگاه ده بالا برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ طبق همه سناریوها (A2, A1B, B1)، از نظر توزیع زمانی، وضعیت متفاوتی نسبت به دوره مشاهده‌ای خواهد داشت. به عبارت دیگر مقدار بارش در برخی ماه‌ها افزایش و در برخی ماه‌ها کاهش خواهد داشت. بر اساس شکل مذکور بیش‌ترین افزایش بارش در سه ماهه (Apr.-May.-Jun) مطابق با فروردین، اردیبهشت، خرداد و بیش‌ترین کاهش این متغیر در ماه‌های (Oct.-Nov.-Jan) یا مهر، آبان و دی انتظار می‌رود. به‌عبارت دیگر توزیع بارش در آینده در ایستگاه ده بالا دچار نوساناتی خواهد شد و از بارش‌های پاییزه کاسته و به بارش‌های بهار افزوده می‌شود. لازم به ذکر است که سناریوی A2 نوسانات را محسوس‌تر نشان می‌دهد. لذا سناریوی مذکور به‌عنوان سناریوی پایه، در مباحث آینده‌نگری منطقه مطالعاتی برگزیده شد.



شکل ۲- مقایسه مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط سناریوهای مختلف در ایستگاه ده بالا. (نواحی مربوط به افزایش بارندگی با دایره مشخص شده است)

Fig. 2. Comparison of the observed and simulated precipitation by different scenarios in Deh Bala Station. (Areas with increasing rainfall has been marked by circle).

نتایج حاصل از ارزیابی مدل HARTT با داده‌های اندازه‌گیری شده تراز آب زیرزمینی در شکل (۵)، ارائه شده است. همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است، مدل ساخته شده قابل اطمینان بوده و می‌توان از آن به‌منظور ارزیابی اثر اقلیم بر آب زیرزمینی استفاده نمود. این مدل قبلاً در سایر مطالعات [۱۵، ۲۴، ۳۵] مورد تأیید قرار گرفته است.

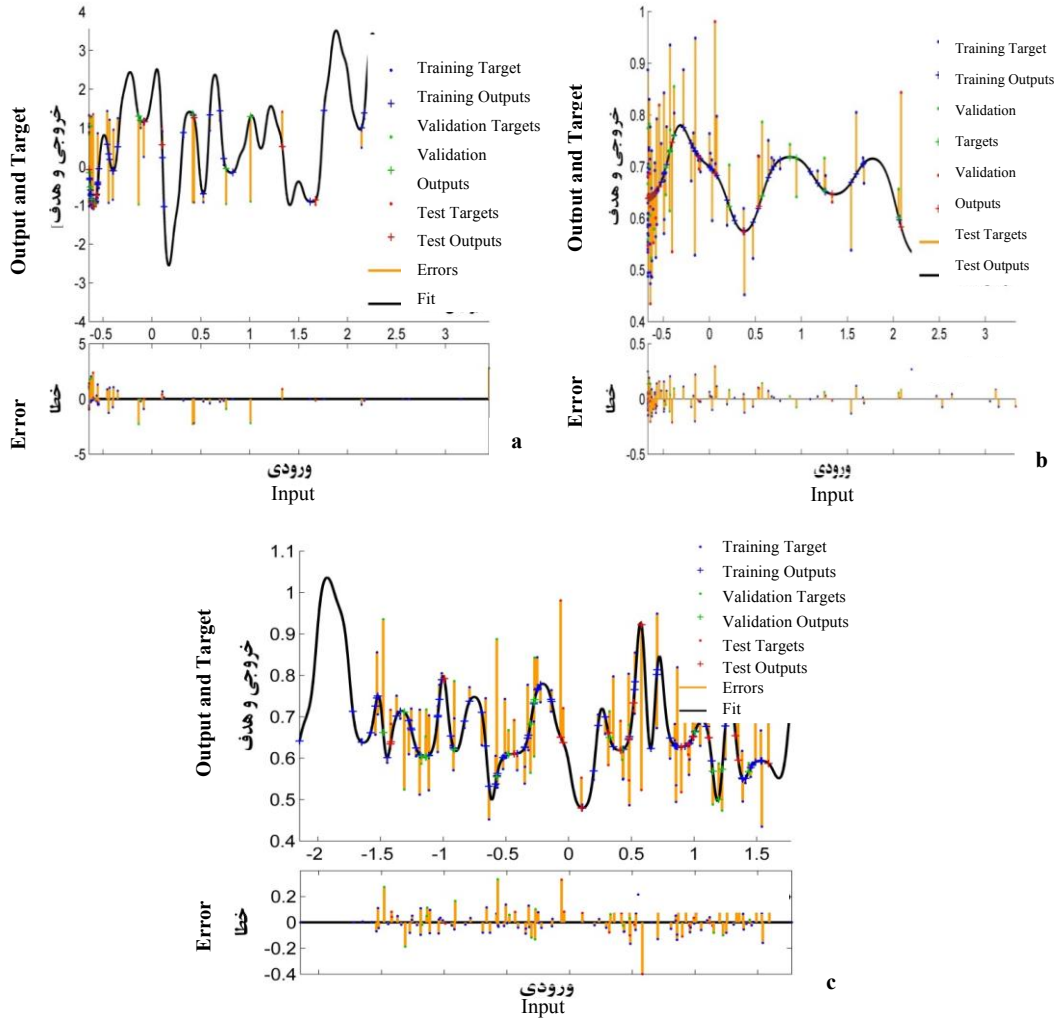
نتیجه‌گیری بررسی تأثیر اقلیم بر تغذیه آبخوان زیرزمینی

در مورد شبکه‌های عصبی، هر چند به نظر می‌رسد مدل a، نسبت به سایر مدل‌ها دارای توانایی مناسبی در برآورد تأثیر اقلیم بر نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌باشد، ولی وجود ضریب رگرسیون (۰.۶۶) بیان‌گر توانایی متوسط مدل مذکور می‌باشد. از طرفی مدل HARTT با ضریب رگرسیون ۰.۹۹٪ و صحت‌سنجی مناسب، توانایی بهتری در مقایسه با شبکه‌های عصبی دارد. لذا مدل HARTT به‌عنوان مدل منتخب برای آینده‌نگری آبخوان زیرزمینی منطقه مطالعاتی برگزیده شد. شکل (۶)، مربوط به نتایج این پیش‌بینی می‌باشد.

مدت زمان لازم برای تأثیر بارش بر آب زیرزمینی، ۶۰ ماه می‌باشد. اکرامی و همکاران [۹] با بررسی ارتباط بین بارندگی و نوسانات آب‌دهی قنوات موجود در دشت یزد-اردکان تأخیر لازم برای ظهور تأثیر بارندگی در آب‌دهی قنوات را یک تا دو سال بیان نمودند. از آنجایی که در مطالعه ایشان آب‌دهی قنوات مورد بررسی قرار گرفته و در بخش خشکه‌کار قنات، حرکت آب سریع‌تر از فضای متخلخل می‌باشد، اختلاف تأخیر به‌دست آمده از این دو مطالعه قابل توجیه است. زمان لازم برای رسیدن تغذیه ناشی از بارندگی‌های اتفاق افتاده در منطقه تغذیه آبخوان یزد-اردکان (عمدتاً ارتفاعات شیرکوه) به آبخوان یزد-اردکان، با در نظر گرفتن ضریب هیدرولیکی ۱۸ تا ۲۰ متر در شبانه‌روز، تأخیر به‌دست آمده از مدل رگرسیونی برازش داده شده را توجیه می‌نماید.

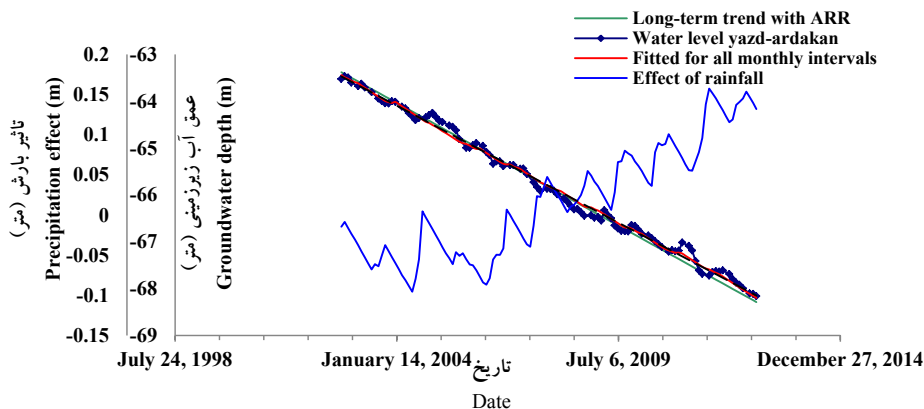
صحت‌سنجی مدل HARTT

به‌منظور ارزیابی صحت مدل آب زیرزمینی، ابتدا داده‌های ۲۴ ماه دوره اندازه‌گیری به‌منظور ارزیابی مدل، کنار گذاشته شد و وارد مدل‌سازی شدند. پس از اتمام مدل‌سازی این داده‌ها در مقابل داده‌های برآورد شده توسط مدل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.



شکل ۳- مقایسه پیش‌بینی شبکه عصبی با داده‌های واقعی، (a) شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با داده‌های تراز آب زیرزمینی دارای روند، بارش و دما، (b) شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی بدون روند و بارش، (c) شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی بدون روند، بارش و دما

Fig. 3. Comparison of the neural network prediction and observed data, a: represents MLP neural network using groundwater level data with trends, precipitation and temperature, b: represents MLP neural network using groundwater level data without trends and precipitation, c: represents MLP neural network using groundwater level data without trends, precipitation and temperature.

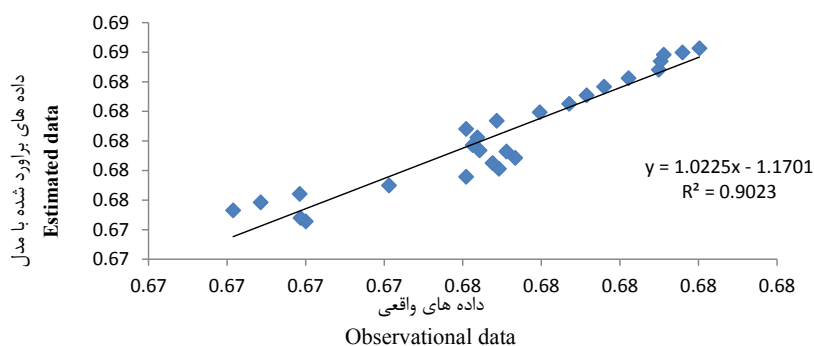


شکل ۴- مدل برازش داده شده به داده‌های آب زیرزمینی با ۶۰ ماه تأخیر در مقابل داده‌های بارش ماهانه در روش HARTT
 Fig. 4. The fitted model to the groundwater data with the-60 month delay against to monthly precipitation data in HARTT method.

جدول ۲- متغیرها و شاخص‌های به کار رفته در مدل HARTT

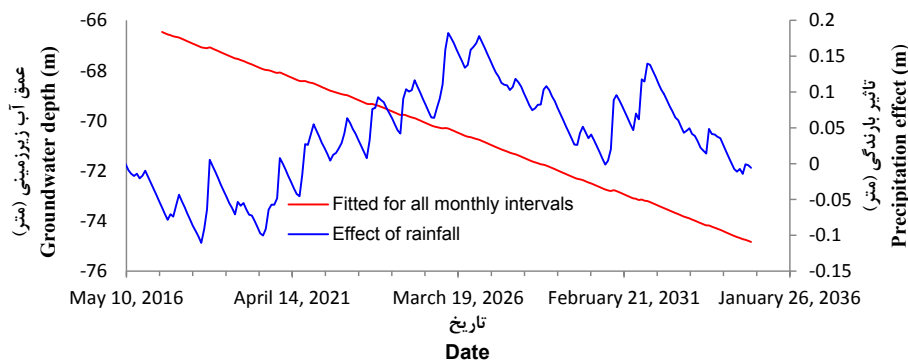
Table .2 Parameters and indicators used in HARTT model.

دوره مورد بررسی (سال)	P Value مربوط به تاثیر زمان	ضریب تاثیر (زمان (ماه)	P Value مربوط به تاثیر بارش	مقدار تاثیر بارش بر عمق آب زیرزمینی	ضریب همبستگی مدل	تعداد تاخیر بهترین مدل AARR	عمق آب زیرزمینی در انتها	عمق آب زیرزمینی در شروع
Study period (year)	P Value related to the time	Impact factor of time (month)	P Value related to the precipitation	The precipitation effects on the groundwater depth	The correlation coefficient of the model	Lags number of the best AARR model	Water depth at the start of the observed data	Water depth at the final of the observed data
9	2.9361×10^{-63}	-0.04	0.039	0.0034	0.992	60	-67.73	-63.525



شکل ۵- نتایج حاصل از ارزیابی مدل HARTT با داده‌های اندازه‌گیری شده تراز آب زیرزمینی.

Fig .5.The results of the evaluation HARTT model using observed data of ground water level.



شکل ۶- تغییرات بارندگی موثر و نوسانات تراز آبخوان در سال‌های آینده.

Fig .6.Changes in the effective rainfall and aquifer level fluctuations in the future.

during 2010-2039, Research Project, Climatological research Institute, climate change research lab, 45pp, (In Persian).

6. Babaeian, I., NajafiNik, Z., Abassi, F., Habibi Nokhandan, M., Adab, H., Malbusi, Sh., Asmari, M. and Borhani, R. 2009. Climate Change Prediction of Iran during 2010-2039 by Using Statistical Downscaling of ECHO-G Data, Iranian Journal of Geography and Development, 16,:135-152, (In Persian).

7. Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. and Palutikof, J.P. 2008. Eds. Climate Change and Water," Technical Paper VI of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

8. Dousti, M., HabibnezhadRoshan, M., Shahedi, K. and Miryaghoubzade, M. H. 2013. Study of climate indices of Tamar River basin Golestan Province in terms of climate change using by LARS-WG model, Iranian Journal of the Earth and Space Physics, 39(4): 177-189, (In Persian).

9. Ekrami, M., Malekinezhad, H. & Ekhtesasi, M.R. (2013). Investigating the climatic drought effects on Groundwater Case Study: Yazd-Ardakan PlaiIran, Watershed Management Science & Engineering, 7(20): 47-54, (In Persian).

10. Roushan, Gh.R., KhoshAkhlagh, F. and Azizi, Gh. 2012. Investigation of suitable general circulation model for temperature and precipitation forecasting under global warming, Journal of Geography and Development, 27: 19-36, (In Persian).

11. Crosbie, R.S., Scanlon, B.R., Mpelasoka, F.S., Reedy, R.C., Gates, J.B., Zhang, L. 2013. Potential climate change effects on groundwater recharge in the High Plains aquifer, USA. Water Resour. Res. 49 (7): 3936-3951.

12. CSIRO, 2009. Groundwater yields in south-west Western Australia: a report to the Australian Government from the CSIRO south-west Western Australi sustainable yeils project, Technical report, Australia.

13. Döll, P. 2009. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. Environ. Res. Lett. 4 (3): 035006.

14. Ferdowsian, R., Pannell, D.J., McCarron, C., Ryder, A. and Crossing, L. 2001. Explaining groundwater hydrographs: separating atypical rainfall events from time trends. Journal of Soil Research, 39(4): 861-876.

15. Ferdowsian, R. Ryser, A., George, R., Bee, G. and Smart, R. 2002. Groundwater level reductions under lucerne

بحث و نتیجه گیری

آبخوان دشت یزد-اردکان از جمله آبخوان‌های دارای بیلان منفی می‌باشد. به طوری که در دهه گذشته (سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰) دارای متوسط افتری برابر با ۰/۵۸ متر در سال بوده است. البته در سال‌های اخیر روند افت آبخوان شدت گرفته است، به طوری که در سال ۱۳۸۵ برابر با ۰/۹ و در سال ۱۳۹۲ دارای افتری معادل یک متر بوده است. ذخیره قابل برداشت آبخوان به طور متوسط ۲۵۹ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. ارتفاع متوسط لایه اشباع نیز در محدوده آبخوان مذکور، برابر با ۱۲۰ متر است، ضریب ذخیره سفره معادل ۰/۴۵ و حجم آب برداشتی توسط بهره‌برداران برابر با ۳۱۷ میلیون متر مکعب است. لذا سالانه ۵۸ میلیون متر مکعب اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی وجود دارد که با در نظر گرفتن مساحت سفره (۲۱۴۰ کیلومتر مربع) و ضریب ذخیره، باعث افت ۶۰ سانتی‌متری سطح آبخوان می‌شود. آینده‌نگری آبخوان با توجه به تغییر اقلیم و روند برداشت‌های انسانی نیز نشان داد تا پایان سال ۲۰۳۳، افت نه متری سطح آبخوان اتفاق خواهد افتاد. چنین روند شتاب‌زده‌ای در افت آبخوان باعث تخریب کیفی و کمی ذخایری خواهد شد که حاصل قرن‌ها دستاورد طبیعت و حراست نسل‌های پیشین است. در نهایت با توجه به شرایط اقلیمی و منابع آبی محدود منطقه، هرگونه توسعه‌ای در جهت مصرف بیش‌تر آب و به خصوص توسعه صنایع آبر و ادعای تبدیل این منطقه به یکی از قطب‌های فعال فولادی و صنعتی کشور، باید از چشم‌اندازهای آینده منطقه مطالعاتی حذف شود.

منابع

1. Abassi, F., Malbusi, Sh., Babaeian, I., Asmari, M. and Borhani, R. 2010. Climate Change Prediction of South Khorasan Province During 2010-2039 by Using Statistical Downscaling of ECHO-G Data Iranian Journal of Water and Soil, 24(2): 218-233, (In Persian).

2. Acharyya, A. 2014. Groundwater, Climate Change and Sustainable Well Being of the Poor: Policy Options for South Asia, China and Africa. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 157: 226-235. doi:10.1016/j.sbspro.2014.11.025

3. Alley, W.M., Reilly, T.E., Franke, O.L., 1999. Sustainability of ground-water resources. 1186, 79 pp.. US GeolSurvCirc 1186, 79 pp.

4. Babaeian, I, Kwon, W. T, and Im, E. S. 2004, Application of Weather Generator technique for climate change assessment over Korea. Korea M

5. Meteorological Research Institute, Climate Research lab. Babaeian, I., and NajafiNik, Z. 2006. Climate change assessment over synoptic station of KhorasanRazavi province

24. Peterson, T.J. and Western A.W. 2011. Time-series modelling of groundwater head and its de-composition to historic climate periods, 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia, 26 June-1 July 2011
25. Seiler, K.P., GU, W.Z. and Stichler, W. 2008. Transient response of groundwater systems to climate changes. In: Dragoni, W., Sukhija, B.S. (Eds.), *Climate Change and Groundwater*. Geological Society, London, Special Publication, pp. 288.
26. Semenov, M.A., and Barrow, E. M. 2002. LARS-WG a stochastic weather generator for use in climate impact studies. User's manual, Version 3.0.
27. Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M., and Richardson, C.W., 1998, Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research* 10.
28. Szilagyi, J., Zlotnik, V.A., Gates, J., Jozsa, J., 2011b. Mapping means annual groundwater recharge in the Nebraska Sand Hills, USA. *Hydrogeol. J.* 19 (8): 1503–1513.
29. Taylor, R.G., et al., 2013. Evidence of the dependence of groundwater resources on extreme rainfall in east Africa. *Nat. Clim. Chang.* 3: 374–378.
30. Todd, D.K. 2005. *Groundwater Hydrology*. Third Edition, John Wiley & sons.
31. Treidel, H., Martin-Bordes, J.J. and Gurdak, J.J. (Eds.), 2012. *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations*. International Association of Hydrogeologists (IAH) – International Contributions to Hydrogeology. Taylor & Francis publishing, 414p.
32. Xu, Z.X., Chen, Y.N. and Li, J.Y. 2004. Impact of Climate Changes on Water Resources in the Tarim River Basin. *Water Resource Management*, 18:, 439-458.
33. Yazd Regional Water Authority Company, (2015). *Water Resources Studies*, (In Persian).
34. Yazd Farda, 2017. Which Provinces Are More Immigrant? 2017/6/27. 138160, (In Persian).
35. Yihdego, Y. and Webb, J.A. 2011. Modelling of bore hydrograph to determine the impact of climate and land-use change in a temperate subhumid region of southeastern Australia, *Hydrogeology Journal* 19: 877-887.
- depend on the landform and groundwater flow systems (local and intermediate) , *Australian Journal of Soil Research* 40(3):381-396.
16. Ferguson, G., Gleeson, T. 2012. Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nat. Clim. Change*. <http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE1413>.
17. Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., ... Aureli, A. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405(3-4): 532–560. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.002
18. Gurdak, J.J., Hanson, R.T., McMahon, P.B., Bruce, B.W., McCray, J.E., Thyne, G.D., Reedy, R.C. 2007. Climate variability controls on unsaturated water and chemical movement, High Plains aquifer, USA. *Vadose Zone J.* 6 (3): 533–547.
19. IPCC, 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.), Core Writing Team. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 104. 527 II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *J. Environ. Qual.*, 37(6): 528–547. <http://dx.doi:10.2134/jeq2008.0015br>
20. Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K.A., Oki, T., Sen Z. and Shiklomanov, I.A. 2007. Freshwater resources and their management. In *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007; pp. 173–210.
21. Liu, H.H., 2011. Impact of climate change on groundwater recharge in dry areas: an ecohydrology approach. *J. Hydrol.* 407, 175–183.
22. Mackay, A. 2008. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group.
23. Mavromatis, T. and Hansen, J.W. 2001. Variability characteristics and simulated crop response of four stochastic weather generators. *Agricultural and Forest Meteorology* 109: 2883-296.