

## بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل مفهومی بیلان (مطالعه موردی: دشت بیرجند)

احمد جعفرزاده<sup>۱</sup>، عباس خاشعی سیوکی<sup>۲\*</sup>، علی شهیدی<sup>۳</sup>

### چکیده

مدیریت منابع آب در مناطق خشک از اهمیت بالایی برخوردار است. از آنجا که در این مناطق بیشتر سهم مصارف متوجه منابع آب زیرزمینی است، اطلاع از وضعیت کمی و کیفی این منابع ضروری است. خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی ابزاری سودمند در جهت پیش‌بینی تغییرات متغیرهای اقلیمی به شمار می‌رود. در این پژوهش در ابتدا جهت بررسی پیامدهای کمی گرم شدن جهانی، با استفاده از بهترین خروجی مدل‌های گردش عمومی اثر تغییر اقلیم بر بارش برآورد گردید، و در ادامه به منظور تحلیل وضعیت کمی آبخوان دشت بیرجند، از مدل مفهومی بیلان استفاده شد. واسنجی و صحت‌سنجی مؤلفه‌ها و اجزاء مدل مفهومی بیلان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO، و میانگین سطح آب زیرزمینی حداقل سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳ (به عنوان ارتفاع مشاهداتی سطح آبخوان) انجام شد. از شاخص‌های  $R^2$  و RMSE به عنوان توابع هدف در این بهینه‌سازی استفاده شد. بازه‌ی تغییرات توابع هدف در مرحله‌ی واسنجی اعضای جمعیت نیز بین ۰/۹۶ تا ۰/۲ برای تابع RMSE، و بین ۰/۷۷ تا ۰/۹۷ برای تابع  $R^2$  رسید. همچنین میزان دقت توابع هدف در مرحله‌ی صحت‌سنجی برای تابع RMSE و  $R^2$  به ترتیب برابر است با ۰/۸۴ و ۰/۹۱. در مرحله‌ی بعد، برآورد سطح آب زیرزمینی آبخوان حداقل سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰ میلادی انجام شد. نتایج مطالعه‌ی حاضر نشان داد که سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند در بازه مطالعه شده با روندی نزولی مواجه خواهد گردید. طبق شبیه‌سازی‌های مدل مفهومی در خصوص سطح آب زیرزمینی، انتظار می‌رود که حدوداً افت تجمعی و ارتفاع سطح آب زیرزمینی در پایان دوره‌ی آتی به ترتیب به ارقام ۷ و ۱۳۱۵/۹ متر برسد.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی، دشت بیرجند، مدل مفهومی بیلان، MOPSO

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری منابع آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

Email: abbaskhashei@birjand.ac.ir, تلفن: ۰۹۱۵۳۳۲۷۴۷۸

<sup>۳</sup> دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

## مقدمه

بخش عمده‌ی کشور ایران در منطقه‌ی خشک جهان قرار داشته و میزان بارش‌های جوی متوسط سالانه‌ی کشور (حدود ۲۴۰ میلی‌متر) از یک سوم متوسط نزولات جوی سالانه کره‌ی زمین (۸۶۰ میلی‌متر) نیز کمتر است (کردوانی، ۱۳۶۳). بر اساس آمارهای موجود ۲۰ استان کشور از حداکثر ظرفیت سفره‌های زیرزمینی خود استفاده کرده‌اند (مؤمنی، ۱۳۸۲). همچنین، سرانه‌ی منابع آبی تجدید پذیر کشور از ۷ هزار متر مکعب در سال ۱۳۳۵ به حدود ۱۸۵۰ مترمکعب تقلیل یافته است (کردوانی، ۱۳۶۳).

سازگاری با تغییر اقلیم یکی از اجزاء برنامه‌ریزی در توسعه‌ی زیربنایی و پذیرفته شده در تمام نهادهای بین‌المللی است. این سازگاری شامل پیش بینی دقیق از وضعیت آینده نیز خواهد بود. از آنجا که در بیشتر نقاط برای اهدافی مانند توسعه‌ی مناطق شهری، افزایش سطح زیر کشت در کشاورزی، کاربرد شدید در صنایع آب‌بر و غیره منابع آب زیرزمینی را ملاک عمل خود قرار می‌دهند، اجرای طرح‌های وابسته به منابع آب بدون برنامه‌ریزی دراز مدت عواقب جبران‌ناپذیری خواهند داشت. از بین رفتن ظرفیت ذخیره‌ی آبخوان‌ها در نتیجه برداشت بی‌رویه، کاهش کیفیت آب زیرزمینی، هدر رفتن این منابع در نتیجه اجرای ناصحیح طرح‌های مربوط به آب از جمله‌ی این موارد است. بدین منظور مطالعات گسترده‌ای در داخل و خارج کشور هدف تحقیق خود را بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی قرار داده‌اند که در ادامه به اختصار به بعضی از آن‌ها اشاره می‌شود. لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر، تعداد مطالعات بررسی اثرهای تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی جهانی و منطقه‌ای، رشد چشمگیری داشته است، هرچند که هنوز تا وضعیت بهینه فاصله دارد. در بیشتر این مطالعات، مقادیر بارندگی در آینده شبیه‌سازی شده و تأثیر آن بر تغذیه آبخوان و تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی بررسی شده است (توماس و همکاران، ۲۰۱۶، کلاو و همکاران، ۲۰۱۴، هاشمی، ۲۰۱۵، بارن ۲۰۱۲، کاستل ۲۰۱۴ و ونگ ۲۰۱۵). تعداد محدودی از مطالعات، به بررسی اثرهای تغییرات اقلیم بر جریان آب سطحی رودخانه و نقش آن در تغذیه‌ی آبخوان پرداخته‌اند (اخرات ۲۰۰۳، کاندزویچ ۲۰۰۸، جایرکاما ۲۰۰۸). برخی مطالعات

نیز به بررسی اثرهای تغییرات کاربری اراضی و اقلیم بر منابع آب زیرزمینی پرداخته‌اند. مشخص کردن میزان تغییرات در تغذیه آبخوان، به دلیل تأثیر درخور توجه‌ی متغیرهای اقلیمی بر این مؤلفه‌ی بیلان آب زیرزمینی از اهمیت فراوانی برخوردار است (سلامی و همکاران ۱۳۹۴). در ادامه مطالعاتی که با استفاده از مدل عددی و یا نرم‌افزارهای شناخته شده در حوزه مطالعات آب زیرزمینی مبادرت به مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی کرده‌اند، ذکر شده است.

در یک پژوهش توهامی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تعادل آب و خاک و تغذیه‌ی آبخوان پرداختند. آن‌ها در این مطالعه آبخوان منطقه ونوس کاستلار را انتخاب نموده و از خروجی‌های مدل HADCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 استفاده کردند. سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ به عنوان دوره‌ی پایه و ۲۰۱۱ تا ۲۰۹۹ به عنوان دوره‌ی آتی در نظر گرفته شدند. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم از مدل HYDROBAL بهره گرفتند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که تغییر اقلیم اثرات قابل توجهی را بر تعادل آب و خاک و به خصوص تغذیه‌ی آبخوان خواهد گذاشت. در هر دو سناریوی انتشار بارندگی، رواناب و تغذیه‌ی آبخوان در سال‌های پیش‌رو نسبت به دوره‌ی پایه کاهش نشان داد. در مطالعه‌ی سانچز و همکاران (۲۰۱۲) اثرات تغییر اقلیم را بر پیش‌روی آب شور در آبخوان‌های ساحلی هلند بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه از MOCDENS3D بهره گرفتند. لیونوما و اکنن (۲۰۱۴) اثرات تغییر اقلیم و تغییرات سطح آب دریای بالتیک را بر آبخوان کم عمق و آزاد ساحلی در جنوب فنلاند مورد کنکاش قرار دادند. نتایج این بررسی که با استفاده از مدل MODFLOW انجام شده است، نشان دهنده‌ی تغییرات فصلی درخور توجه در تغذیه‌ی آبخوان طی دوره‌ی آتی است، به طوری که منطقه منظور زمستان‌های پرآب‌تر و تابستان‌های خشک‌تری را تجربه خواهد کرد. سلامی و همکاران (۱۳۹۴) مبادرت به پیش بینی احتمالاتی اثرهای تغییر اقلیم بر آبخوان آبرفتی دشت همدان-بهار کردند. در این بررسی، از داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک همدان و مقدار تغییرات بارش و دما در سطح احتمال ۹۰ درصد برای سناریوی انتشار A2، به عنوان بحرانی‌ترین شرایط از نظر تغذیه‌ی آب زیرزمینی استفاده شد. مقادیر بارش و دما نیز به وسیله‌ی

زیرزمینی با استفاده از مدل‌های عددی نموده‌اند. محتشم و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل GMS اقدام به پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان بیرجند کردند. آن‌ها در این پژوهش با استفاده از رویکرد تفاضل محدود، معادله‌ی جریان آب زیرزمینی آبخوان آزاد دشت بیرجند را واسنجی کرده و پس از تأیید نتایج در مرحله‌ی آزمایش و صحت‌سنجی اقدام به پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در شرایط غیرماندگار نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان دادند که به دلیل برداشت‌های بی‌رویه در سطح آبخوان، روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در آینده به صورت نزولی خواهد بود. اکبرپور و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از ترکیب دو مدل MODFLOW و WEAP اقدام به برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی دشت بیرجند کردند. آن‌ها در مطالعه خود با استفاده از تفاضل محدود اقدام به حل معادله دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی نموده‌اند. در ادامه و پس از حصول اطمینان از واسنجی مدل اقدام به پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و بررسی سناریوهای تخصیص شده است. نتایج مطالعه آن‌ها نشان دادند که کسری آبخوان بیش از ۱۴ میلیون مترمکعب است. همچنین، جهت غالب جریان از سمت شرق به غرب بوده و عمق سطح آب در مناطق غربی کاهش می‌یابد. همچنین محتشمی و همکاران (۱۳۹۵) نیز با استفاده از روش Mesh Less اقدام به حل معادله آب زیرزمینی دشت بیرجند در حالت ماندگار نموده و نتایج را با آمار چاه‌های مشاهداتی مقایسه کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان از دقت بالای این روش در شبیه‌سازی سطح ایستابی آبی زیرزمینی دارد. به‌طوری‌که مقدار خطای جذر میانگین مربعات در حدود ۰/۴۸۵ برآورد شد. در پژوهشی دیگر محتشمی و همکاران، (۲۰۱۷) با استفاده از رویکرد Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) اقدام به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در حالت غیر اشباع دشت بیرجند کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها حاکی از دقت بالای روش مذکور داشته؛ به نحوی که مقدار شاخص ریشه میانگین مربعات خطا در حدود ۰/۷ برآورد گردید.

لکن مطالعاتی زیادی وجود دارند که اقدام به بررسی و تخمین جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های مفهومی کرده‌اند. در پژوهشی جوکیک و دنیک-جوکیک (۲۰۰۹) با استفاده از یک مدل مفهومی اقدام به تخمین بیلان آب زیرزمینی در یک آبخوان کارستی واقع در

مدل LARS-WG، به شکل روزانه برای دوره‌ی آبی تولید گردید. با استفاده از شبکه‌ی عصبی چندلایه و مدل آب زیرزمینی MODFLOW، به ترتیب مقادیر رواناب روزانه و نوسان‌های سطح آب زیرزمینی تخمین زده شد. نتایج نشان دهنده‌ی افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۳۸ متر در دوره‌ی آبی، به خصوص در مناطق جنوب و جنوب غربی آبخوان، ناشی از برداشت چشمگیر آب زیرزمینی است. با توجه به ضخامت اشباع کنونی آبخوان که حدود ۵۰ متر است، در پایان دوره‌ی شبیه‌سازی، ضخامت اشباع آبخوان حدود ۱۲ متر خواهد بود. همچنین پورتمن و همکاران (۲۰۱۳)، در مطالعه‌ای به منظور ارزیابی منافع حاصل از جلوگیری انتشار گازهای گلخانه‌ای با توجه به منابع آبهای زیرزمینی از مدل WateraGap استفاده کردند. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی جنوب شرقی استرالیا، کروسبی و مک‌کالوم (۲۰۱۲)، اقدام به شبیه‌سازی با استفاده از مدل WAVES کردند. آن‌ها ۳ سناریوی آینده‌ی مرطوب، آینده‌ی خشک و حالت بینابین را براساس سناریوهای اقلیمی برای وضعیت آبخوان در آینده در نظر گرفتند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن بودند که، در حالت مرطوب تغذیه آبخوان‌های این مناطق رشد ۳۲ درصدی نسبت به وضعیت فعلی خواهد داشت. در مطالعه‌ای توئز و آلن (۲۰۰۹) با استفاده از مدل MODFLOW اقدام به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی کردند. در این مطالعه از مدل HELP به منظور برآورد تغذیه استفاده شد. در تحقیقی دیگر تامپسون و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل MIKE SHE/MIKE 11 اقدام به شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی مناطق پست جنوب انگلستان کردند. در مطالعه‌ای جکسون و همکاران (۲۰۱۱) اثرات تغییر اقلیم را بر آبخوان گچی در شرق لندن مدل‌سازی کردند. آن‌ها برای نیل به هدف فوق از مدل ZOODRM بهره گرفتند. به منظور شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی نوار غزه در فلسطین اشغالی موقیر و آجیور (۲۰۱۳) از مدل Visual-MODFLOW بهره گرفتند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از آن بودند که در سال ۲۰۳۰ میلادی تغذیه‌ی آبخوان در مناطق جنوبی و میانی نوار غزه کاهش نشان داده و کسری مخزن آن شدیدتر خواهد شد.

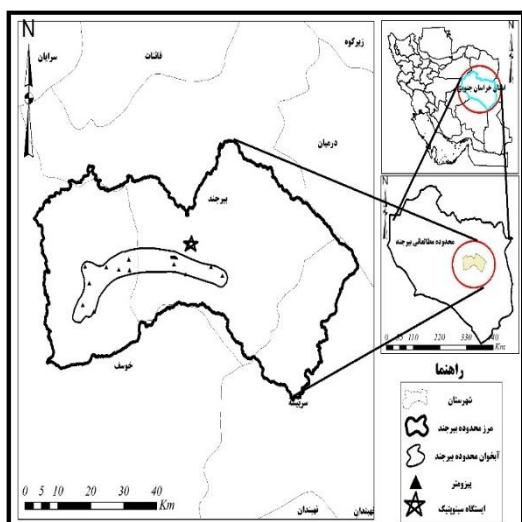
در این میان مطالعاتی نیز وجود دارند که با تمرکز بر منطقه‌ی مطالعاتی دشت بیرجند اقدام به مدل‌سازی آبهای

حال آنکه مطالعه فوق پس از بررسی خروجی ۱۵ مدل گردش عمومی، بهترین آن‌ها را متناسب با شرایط اقلیمی انتخاب خواهد نمود.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مطالعه شده

شهرستان بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی در شمال رشته کوه‌های باقران و در محدوده‌ی ۵۹ درجه و ۱۳ ثانیه طول جغرافیایی و با ۳۲ درجه و ۵۳ ثانیه عرض جغرافیایی قرار گرفته است. وسعت این شهر ۴۲/۷ کیلومتر مربع، دارای ۲ بخش و ۱۰ دهستان است. میانگین حداقل و حداکثر دمای سالانه بیرجند به ترتیب ۸ و ۲۴ درجه سانتی گراد است. بارش سالانه ۱۵۲ میلی‌متر و ارتفاع از سطح دریا ۱۴۹۱ متر است. میزان ظرفیت تبخیر دشت بیرجند ۱۷۴۵/۳۸ میلی‌متر برآورد شده است (جعفرزاده و همکاران، ۲۰۱۸). شکل (۱) جزئیات بهتری از موقعیت دشت بیرجند را ارائه می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی بیرجند

به منظور تخمین مؤلفه‌های اقلیمی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم عموماً از مدل‌های گردش عمومی بهره گرفته می‌شود. این مدل‌ها اثرات گرمایش جهانی را در لایه مختلف سطح و اطراف زمین و تحت قوانین و معادلات فیزیک (شامل تکانه، بقای جرم، قانون عمومی گازها، قوانین ترمودینامیک و شناوری) شبیه‌سازی می‌کنند.

رشته‌کوه‌های دینار کشور کرواسی نمودند. مطالعه گیتس و همکاران (۲۰۰۸) درخصوص به کارگیری مدل مفهومی بیلان برای شبیه‌سازی تغذیه‌ی آبخوان بدین جرن (Badain Jaran) در کشور چین انجام شده است. همچنین روجاس و همکاران (۲۰۰۸) اقدام به بررسی عدم قطعیت مدل‌های مفهومی در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی پرداختند. پژوهش Son سین و سیوپالان (۲۰۰۷) نیز با هدف تأثیر داده‌های کمکی بر بهبود ساختار و کاهش عدم قطعیت مؤلفه‌های مدل مفهومی بیلان آبخوان انجام شد. در مطالعه‌ای اکبرزاده و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبهای زیرزمینی حوضه‌ی آبریز صوفی چای پرداختند. بدین منظور داده‌های میانگین ماهانه بارش ۶ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی موجود در منطقه مطالعه شده مورد بررسی قرار گرفت و همچنین جهت نشان دادن تغییرات مکانی بارش از نرم‌افزار Arc GIS 9.3 بهره گرفته شد. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در حوضه‌ی صوفی چای در ماه‌هایی که دارای بارش بیشتر هستند، عمق دسترسی به آبهای زیرزمینی کاهش یافته و سطح آب بالا آمده است و همچنین روند داده‌های بارش و دمای مراغه، کاهش بارش و افزایش دما را در دهه‌های اخیر نشان می‌دهد که همین امر باعث افزایش تبخیر و کاهش بارش‌های برفی شده که خود تأثیر زیادی در کاهش آب‌های زیرزمینی دارد.

اکثر مطالعات فوق به منظور شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر آبهای زیرزمینی از مدل‌های عددی استفاده نموده‌اند. لکن باید توجه داشته که در اقلیم‌های خشک نظیر منطقه مطالعه شده به دلیل اینکه اکثر اوقات سال بدون بارش سپری شده و اغلب بارش‌ها به صورت مقادیر حدی رخ می‌دهد و همچنین به دلیل فقدان بسترهای لازم (کمبود چاه‌های مشاهده‌ای، عدم مطالعات پیوسته مؤلفه‌های هیدرولیکی آبخوان) جهت شبیه‌سازی عددی و تحلیلی، استفاده از روش‌های مفهومی ناگزیر روش مناسبی به نظر می‌رسد. در این مطالعه ضمن شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی به صورت ماهانه تا افق ۲۰۳۰، عملکرد روش مفهومی بیلان آبخوان نیز بررسی می‌شود. بدین منظور سعی می‌شود تا جهت بررسی توانمندی این روش از الگوریتم‌های نوین فراابتکاری چندهدفه استفاده شود. به طور کلی مطالعات فوق جهت شبیه‌سازی مقادیر مؤلفه‌های اقلیمی از یک یا دو مدل گردش عمومی استفاده نموده‌اند؛

## ریز مقیاس نمایی

۱- ویژگی های آماری داده های دیده بانى در این گام تعیین و تحلیل می شود. ۲- در گام دوم مدل با استفاده از داده های مشاهداتی، اقدام به بازتولید آن ها کرده و خصوصیات آماری این داده های مصنوعی را تعیین می کند. مدل از یک توزیع نیمه تجربی برای نمایش توزیع تجربی داده های مشاهداتی استفاده می کند (ریچاردسون و همکاران، ۱۹۸۴) ۳- مدل داده های مشاهداتی و بازتولید شده را از نظر آماری آنالیز می کند. از آزمون های F-، t-test، chi-square و test به منظور ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی استفاده می شود. نتیجه این آزمون ها نشان خواهد داد که آیا مدل توانایی تولید داده را در آینده خواهد داشت؟ ۴- به منظور شبیه سازی وضعیت اقلیمی آینده محل مورد نظر، مدل با وارد کردن سناریوهای انتشار گازهای گلخانه ای و خروجی مدل های اقلیمی به داده های دوره پایه باز تولید شده، تغییرات اقلیمی آینده را شبیه سازی می کند. لازم به ذکر است که سناریوهای انتشار و خروجی مدل های اقلیمی در داخل مدل تعریف شده اند و عملاً نیازی به پایگاه داده نیست.

### مدل گردش عمومی (GCM)

در این مطالعه با توجه به مطالعات جعفرزاده (۱۳۹۵) از مدل BCM2 تحت سناریوی B1 به عنوان سازگارترین خروجی موجود در بایگانی مدل LARS-WG برای شبیه سازی متغیر بارندگی استفاده شد. نام کامل این مدل که در مرکز تحقیقات اقلیمی بیجرکنس نروژ (Bjerknes Centre for Climate Research, Norway) توسعه پیدا کرده است، BCCR-BCM2.0 بوده که به اختصار BCM2 نامیده می شود. به منظور تعیین سازگارترین خروجی مدل های گردش عمومی، آمار مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک بیرجند شامل مؤلفه های بارندگی، دماهای حداکثر و حداقل و تابش خورشیدی به صورت روزانه حداقل سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ میلادی به عنوان دوره ی پایه (واسنجی مدل LARS-WG) به مدل معرفی شد. پس از واسنجی، از ۱۵ مدل گردش عمومی موجود در آرشیو LARS-WG تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 به منظور مقایسه با آمار مشاهداتی استفاده شد. بدین ترتیب بهترین و سازگارترین خروجی تعیین می شود. جدول (۱) جزئیات کاملی را از سناریوهای انتشار تغییر اقلیم ارائه می دهد (جعفرزاده، ۱۳۹۵).

به منظور پیش بینی مقدار متغیرهای اقلیمی نظیر بارش، مهم ترین ابزار استفاده از خروجی مدل های گردش عمومی GCM است. مدل های GCM مورد استفاده برای شبیه سازی اقلیم به طور معمول از قدرت تفکیک مکانی افقی چند صد کیلومتر برخوردارند. با این حال، به منظور ارزیابی درست منطقه ای و محلی اثرات تغییر اقلیم، محققان نیاز به سطح بسیار بالاتری از جزئیات - در حد ۱۰ کیلومتر را دارند. از این رو از فرآیندی به نام ریزمقیاس نمایی استفاده می شود. ریزمقیاس نمایی فرایند انتقال اطلاعات اقلیمی از یک مدل اقلیمی درشت مقیاس به ریزمقیاس است (زمنف، ۲۰۰۲).

به دلیل بزرگ مقیاس بودن خروجی این مدل ها، جهت دستیابی به چشم اندازهای دوره های آبی و ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در مقیاس منطقه ای به طور مستقیم قابل استفاده نیستند، لذا نیازمند ریزمقیاس نمایی با توجه به رفتار اقلیمی مشاهداتی منطقه مطالعه شده هستند. بدین منظور مؤلفه های بارندگی، دماهای حداکثر و حداقل و تابش خورشیدی به صورت روزانه حداقل سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ میلادی از سازمان هواشناسی استان گرداوری، و دوره ی مذکور به عنوان دوره ی پایه انتخاب در نظر گرفته شد. در این مطالعه جهت ریزمقیاس نمایی خروجی مدل های گردش عمومی از مدل LARS-WG بهره گرفته شد.

### مدل LARS-WG

این مدل در ایستگاه تحقیقاتی لانگ اشتون (Long Ashton Research Station-Weather Generator) به وسیله میخائیل زمنف (Michael Semenov) طراحی و توسعه داده شد، LARS-WG مولد تصادفی آب و هوا است که برای شبیه سازی آب و هوای یک منطقه در هر دو شرایط آب و هوایی حال حاضر و آینده استفاده می شود (صالح نیا و همکاران، ۱۳۹۳). این مدل رگرسیونی چند متغیره برای تولید داده های آب و هوایی از روش های آماری استفاده می کند (ویلیکس ۱۹۹۲). همچنین به دلیل تکرار محاسبات، نیاز کمتر به داده های ورودی و سادگی کاربرد بیشتری نسبت به سایر مدل ها دارد (زمنف و باروف، ۱۹۹۲). می توان مراحل کار با این مدل را به ۴ گام زیر متصور شد:

جدول ۱. جزئیات سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای

B1	A2	A1B	شاخص‌های توسعه جامعه
کم	کم	کم	رشد جمعیت
زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	تولید ناخالص داخلی
کم	زیاد	خیلی زیاد	استفاده از انرژی
زیاد	کم	کم	تغییر کاربری زمین
پایین	متوسط	متوسط	منابع سوخت در دسترس (گاز و نفت)
سریع	سریع	سریع	تغییر تکنولوژی
انرژی پاک و کارآمد	بدون سوخت فسیلی	متعادل	نوع استفاده از انرژی (فسیلی و پاک)

ازدحام ذرات (Multi-Objective Particle Swarm Algorithm - MOPSO) اقدام به واسنجی اجزاء معادله بیلان آبخوان شد. در نهایت به منظور تعیین دقت خروجی الگوریتم و همچنین صحت مقادیر واسنجی شده، اقدام به صحت‌سنجی معادله‌ی مفهومی بیلان می‌شود.

### مدل مفهومی بیلان آبخوان دشت بیرجند

با شروع بارندگی با توجه به ظرفیت نفوذپذیری زمین و پوشش گیاهی بخشی از بارندگی مستقیماً به داخل آبخوان نفوذ کرده، بخشی دیگر تبدیل به رواناب می‌شود و مقادیری از بارندگی هم صرف پرکردن نقاط پست زمین می‌گردد (چالاب).

جریان‌های ورودی و خروجی در آبخوان، تخلیه‌ی مصارف شرب، صنعت و کشاورزی، حجم آب برگشتی، و حجم نفوذی از بارش و رواناب از جمله مؤلفه‌های تأثیرگذار در معادله‌ی بیلان آبخوان است. در واقع، بیلان آبخوان وابسته به بارش باران (ورودی) و تخلیه مصارف متنوع (خروجی) است:

$$R = (I_p + I_i + I_d) - (O_d + O_o) \quad (1)$$

که در آن R بیلان آبخوان،  $I_p$  جریان نفوذی ناشی از بارندگی،  $I_i$  جبهه‌ی‌های ورودی به آبخوان،  $I_d$  جریان برگشتی ناشی از مصارف،  $O_d$  جریان خروجی ناشی از مصارف و  $O_o$  جبهه‌ی‌های خروجی از آبخوان را نشان می‌دهد.

معادله‌ی (۲) جزئیات دقیق معادله‌ی (۱) را نمایش می‌دهد.

### مدل مفهومی بیلان آبخوان دشت بیرجند

به دلیل کمبود ریزش‌های جوی در مناطق خشک و نیمه خشک نظیر محدوده مطالعاتی بیرجند، مدیریت منابع آب وابستگی شدیدی به آبهای زیرزمینی پیدا کرده است. باید توجه داشت که مدیریت منابع آبهای زیرزمینی در نخستین گام نیازمند شناخت عملکرد سفره در شرایط طبیعی است. بدون شک بهترین حالت شناخت رفتارهای یک آبخوان، انجام تحقیقات طولانی برای هر منطقه است که با توجه به سقف محدود اعتبارهای تحقیقاتی عملاً امکان‌پذیر نیست. با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های موجود جریان آب در لایه‌های آبدار استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رفتار آب زیرزمینی کمک شایانی می‌کند. هدف از تدوین مدل مفهومی، شبیه‌سازی شرایط طبیعی آبخوانی با استفاده از روابط مفهومی است. در صورتی که بتوان شبیه‌سازی آبخوانی را با شرایط طبیعی تطبیق داد، به سهولت می‌توان با تغییرات در محل، مقدار و زمان برداشت به بررسی اثرات برداشت بر آبخوان پرداخت (عباس‌پور و همکاران، ۲۰۰۹). مدل‌های مفهومی همواره دارای اجزائی هستند که می‌بایست با توجه به داده‌های مشاهداتی تخمین زده شوند. تخمین دقیق این اجزاء، از اهمیت بسزائی برخوردار بوده و تحقیقات آینده بستگی به چگونگی تخمین آن‌ها دارد. یکی از روش‌های واسنجی مدل‌ها استفاده از روش‌های واسنجی خودکار (الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری) است که نسبت به سایر روش‌های سعی و خطا سریع‌تر و دقیق‌تر هستند. در این مطالعه ابتدا با توجه به جزئیات دقیق اجزاء مدل مفهومی آبخوان، معادله این مدل بیان می‌شود. در ادامه با استفاده از آمار مشاهداتی سطح آب در آبخوان و الگوریتم چند هدفه

$$OUT = discharge + output$$

$$IN = Input + Agri\_reach + Ind\_reach + Dom\_reach + P\_reach \quad (۲)$$

$$\Delta V = IN - OUT$$

الگوریتم، شبیه‌سازی یک رفتار دسته جمعی است که از آن برای نشان دادن حرکت گروه پرند‌ها و ماهیان استفاده می‌شود. الگوریتم PSO نیز مانند سایر روش‌های محاسبات تکاملی، از یک جمعیت اولیه، که شامل راه‌حل‌های بالقوه‌ی مسئله تحت بررسی است، جهت اکتشاف در فضای جستجو استفاده می‌کند. هر چند که در این الگوریتم هر عضو از جمعیت، دارای یک سرعت (تغییر مکان) است که مطابق با آن در فضای جستجو حرکت می‌کند، علاوه بر آن هر کدام از آن‌ها نیز دارای حافظه هستند، یعنی بهترین موقعیتی را که در فضای جستجو به آن می‌رسند به خاطر می‌سپارند. بنابراین، حرکت هر عضو در دو جهت صورت می‌گیرد:

- ۱- به سوی بهترین موقعیتی که ملاقات کرده‌اند.
- ۲- به سوی بهترین موقعیتی که بهترین عضو در همسایگی آن‌ها ملاقات کرده است.

فرض کنید که فضای جستجوی مسئله، دارای D بعد باشد، پس i آمین ذره از جمعیت را می‌توان با یک بردار D بعدی  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$  نمایش داد، و سرعت آن (تغییر مکان آن) را هم می‌توان با بردار D بعدی  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  نمایش داد. بهترین موقعیت ملاقات شده توسط هر ذره را با pbest و بهترین موقعیت ملاقات شده در کل ذرات را با gbest نشان می‌دهند. در نهایت کل جمعیت مطابق با دو رابطه زیر با مهارت به حرکت در می‌آید.

$$v_{i+1}^i = w v_i^i + c_1 r_1 (pbest_i^i - x_i^i) + c_2 r_2 (gbest_i^i - x_i^i) \quad (۴)$$

$$x_{i+1}^i = x_i^i + v_{i+1}^i \quad (۵)$$

مطالعه گسترده‌ای برای اولین نسخه PSO توسط Kennedy انجام گرفته است. به عنوان پیش فرض مقدار  $c_1=c_2=۲$  پیشنهاد شده است، اما نتایج تجربی نشان می‌دهند که مقادیر  $c_1=c_2=۰/۵$  ممکن است نتایج بهتری را حاصل نمایند. تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که ممکن است انتخاب مؤلفه شناختی  $c_1$  بزرگتر از مؤلفه اجتماعی  $c_2$  با این شرط که  $c_2 + c_1 \leq ۴$  باشد، منجر به نتایج

که در آن discharge حجم تخلیه، output حجم جبهه‌ی خروجی، input حجم جبهه‌ی ورودی، Agri\_reach, Dom\_reach, Ind\_reach و P\_reach به ترتیب حجم برگشتی از مصارف کشاورزی- دامپروری، شرب- خدمات، صنعت و حجم نفوذ حاصل از بارندگی هستند. همچنین تخلیه‌ی سالانه از آبخوان معادل ۷۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است. تخلیه کشاورزی، صنعت و شرب به ترتیب ۶۲، ۲۴ و ۱۴ درصد اعمال شد. تفاوت حجم ورودی و خروجی نسبت به سطح آبخوان و با در نظر گرفتن ضریب ذخیره، نشان دهنده‌ی تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان است. معادله‌ی (۳) این موضوع را بیان می‌کند.

$$\Delta h = \Delta V / A \times S \quad (۳)$$

$$h_{i+1} = h_i + \Delta h$$

در رابطه‌ی فوق A و S به ترتیب مساحت و ضریب ذخیره‌ی آبخوان هستند. طبق معادله (۳) سطح آب زیرزمینی آبخوان در ابتدای هر ماه از حاصل جمع تغییرات و مقدار سطح آب زیرزمینی در ماه قبل به دست می‌آید. معادلات (۱) تا (۳) به عنوان مدل مفهومی تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان در نظر گرفته شدند.

### واسنجی - الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

این روش بهینه‌سازی اولین بار توسط ابارهات و کندی در سال ۱۹۹۵ میلادی ارائه شد. اساس این

که در آن x موقعیت ذرات، v سرعت ذرات، i شمارنده ذرات، w ضریب لختی وزنی (inertia weight)،  $c_1$  و  $c_2$  مؤلفه‌های شناختی (cognitive) و اجتماعی (social) (دو ضریب ثابت و مثبت) و  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی در محدوده‌ی (۰ و ۱) با توزیع یکنواخت است. از ضریب اینرسی وزنی جهت کنترل تأثیر سوابق سرعت‌های پیشین بر سرعت‌های جاری، مورد استفاده می‌شود. در خصوص ضرایب  $c_1$  و  $c_2$

بهترین تجربه شخصی هر ذره تعیین می‌شود. ۴- اعضای نامغلوب جمعیت جداسازی و در مخزن ذخیره می‌شوند. ۵- هر ذره از میان اعضای مخزن یک رهبر را انتخاب می‌کند و حرکت خود را انجام می‌دهد. ۶- بهترین تجربه‌ی شخصی هر کدام از ذرات به روز می‌شوند. ۷- اعضای نامغلوب جدید ۷- اعضای نامغلوب جدید به مخزن افزوده می‌شوند. ۸- اعضای مغلوب مخزن حذف می‌شوند. ۹- در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده است از شماره ۵ به بعد الگوریتم تکرار می‌شود. در واقع در پایان عملیات بهینه‌سازی توسط الگوریتم، جواب‌هایی را خواهیم داشت تا متناسب با شرایط تصمیم‌گیری یکی از آن‌ها را انتخاب کنیم. در بهینه‌سازی چند هدفه این امکان به مدیران داده می‌شود تا با بررسی شرایط اقدام به انتخاب تصمیم‌های خاص نمایند (پرهیزکاری، ۲۰۱۹).

با استفاده از آمار ماهانه سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان حدفاصل سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۹۳ و محاسبه ضریب تأثیر هر کدام از پیژومترها (با استفاده از ابزار تیسنبندی در نرم‌افزار ArcView) سطح آب زیرزمینی میانگین آبخوان به دست آمد و به عنوان آمار مشاهداتی در واسنجی استفاده شد. جدول (۲) جزئیات دقیق چاه‌های مشاهده‌ای انتخابی را نشان می‌دهد. سطح آب زیرزمینی آبخوان در ابتدای واسنجی معادل ۱۳۱۷ متر به دست آمد.

جدول ۲. چاه‌های مشاهده‌ای انتخابی در آبخوان دشت بیرجند

محل پیژومترها	UTMX	UTMY	TARAZ (m)	درصد پوشش مساحت
تقاب	680949	3638227	1365.12	8.48
جاده خوسف- کویر تاپر	693320	3638923	1428.84	17.47
جنوب حاجی آباد	701534	3638970	1425.44	4.05
جنوب شرق محمدیه	690820	3637697	1452.43	6.37
خوسف کوچه	677230	3627836	1314.02	10.43
راه خوسف - محمدیه	691322	3638761	1421.76	4.05
سراب	707009	3636374	1512.7	11.83
سیوجان، جنب منبع	683819	3638673	1364.24	7.80
شمال رکات- امیر آباد	693718	3641657	1408.98	5.28
شمال روستای شاهزله	674499	3638383	1406.64	7.33
شمال محمدیه- شور رود	687790	3640119	1378.71	7.76
شوکت آباد قدیم	712800	3638300	1496.95	9.15
نصرآباد، جنب حوض	673802	3629361	1300.52	8.48

بهتری شود. مؤلفه‌های  $r1$  و  $r2$  برای حفظ تنوع و گوناگونی جمعیت به کار می‌روند و آن‌ها اعداد تصادفی در محدوده‌ی (۰ و ۱) با توزیع یکنواخت هستند (ابراهات و کندی، ۱۹۹۵). در این مطالعه از مقادیر پیش‌فرض الگوریتم PSO استفاده شد. بدین ترتیب ضریب لختی اولیه، مؤلفه‌های شناختی و اجتماعی و ضریب کاهش لختی به ترتیب ۱، ۲، ۲ و ۰/۹۹ لحاظ شده است.

### الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO)

الگوریتم MOPSO توسط کوئلو در سال (۲۰۰۴) معرفی گردید. در الگوریتم MOPSO یک مفهومی به نام مخزن نسبت به الگوریتم PSO اضافه شده است. هنگامی که ذرات می‌خواهند حرکتی را انجام دهند یک عضو از مخزن را به عنوان رهبر انتخاب می‌کنند. این رهبر حتماً باید عضو مخزن، و همچنین نامغلوب باشد. اعضای مخزن بیانگر جبهه‌ی پارتو و شامل ذرات نامغلوب هستند. پس به جای gbest یکی از اعضای مخزن انتخاب می‌شود. به این دلیل در PSO مخزن وجود ندارد زیرا در آن تنها یک هدف وجود دارد و یک ذره است که بهترین است. اما در MOPSO چند ذره وجود دارند که نامغلوب هستند و در مجموعه جواب جای دارند. ترتیب اجرای این الگوریتم به شرح زیر می‌است: ۱- تعیین مؤلفه‌های لازم برای اجرای الگوریتم MOPSO ۲- جمعیت اولیه ایجاد می‌شود. ۳-



جدیدی (پیدا کردن مقادیر جدید برای متغیرهای تصمیم) برای خود تعیین کنند. در این مرحله برای هر کدام از اعضای جمعیت، یکی از اعضای نامغلوب به عنوان gbest تعیین می‌شود. بعد از ثبات کلیه ذرات در موقعیت جدید، اعضای نامغلوب به روز می‌شوند. در گام بعدی (سوم) بوسیله اعضای نامغلوب جبهه‌ی پارتو تشکیل شده و نمایش داده می‌شود. گام دوم به تعداد مشخصی تکرار می‌شود. در پایان این گام بهترین جواب مشخص شده و نمایش داده می‌شود. گام‌های دوم و سوم به تعداد مشخصی تکرار می‌شود. در این مطالعه مقدار تکرار معادل ۲۰۰۰ مرتبه قرار داده شد.

متناسب با گزارش‌های تمدید ممنوعیت و بیلان محدوده مطالعاتی بیرجند، حدود تغییرات اجزاء معادله بیلان طبق جدول (۳) در نظر گرفته شد. به منظور شروع واسنجی کلیه اعضای جمعیت مؤلفه‌های ستون اول جدول (۳) را به عنوان متغیر تصمیم انتخاب می‌کنند. در گام اول الگوریتم جمعیت اولیه به تعداد ۲۰۰ ذره تشکیل می‌شود و مقدار توابع هدف برای هر کدام از ذرات مطابق با رابطه (۶) و (۷) محاسبه می‌شود. بدین ترتیب کلیه ذرات برای سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۳ سطح آب زیرزمینی را برآورد می‌کنند. بعد از تشکیل جمعیت اولیه، اعضای نامغلوب جمعیت تعیین می‌شوند. در گام دوم کلیه اعضای جمعیت طبق معادله‌های (۴) و (۵) جهش می‌یابند تا موقعیت

جدول ۳. جزئیات متغیرهای معادله بیلان

نام متغیر	حداکثر مقدار	حداقل مقدار	واحد
جبهه‌ی ورودی	۲۷	۲۲	میلیون متر مکعب
نفوذ حاصل از بارندگی	۱۰	۵	درصد
میزان برگشت حاصل از کشاورزی- دامپروری	۲۵	۱۵	درصد
میزان برگشت حاصل از شرب- خدمات	۶۰	۴۰	درصد
میزان برگشت حاصل از صنعت	۶۰	۴۰	درصد
جبهه‌ی خروجی	۳	۱	میلیون متر مکعب
ضریب ذخیره	۰/۰۹	۰/۰۵	-

### صحت‌سنجی معادله‌ی مفهومی بیلان

در این قسمت با استفاده از معادله‌ی مفهومی بیلان آبخوان، و همچنین مقادیر و ضرایب واسنجی شده اقدام به برآورد سطح آب زیرزمینی حدفاصل سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳ میلادی می‌شود. در نهایت با استفاده از شاخص‌های ارزیابی استفاده شده در مرحله‌ی واسنجی دقت معادله و الگوریتم ارزیابی می‌گردد.

$$Z_1(RMSE) = \sqrt{\frac{\sum_i^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$Z_2(r^2) = \frac{\left[ \sum_i^n (O_i - \bar{O}) \times \sum_i^n (S_i - \bar{S}) \right]^2}{\sum_i^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_i^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (7)$$

که در روابط فوق  $O_i$  داده‌های مشاهداتی،  $S_i$  داده‌های شبیه‌سازی و  $n$  تعداد داده‌ها هستند.

### برآورد سطح آب زیرزمینی در آینده

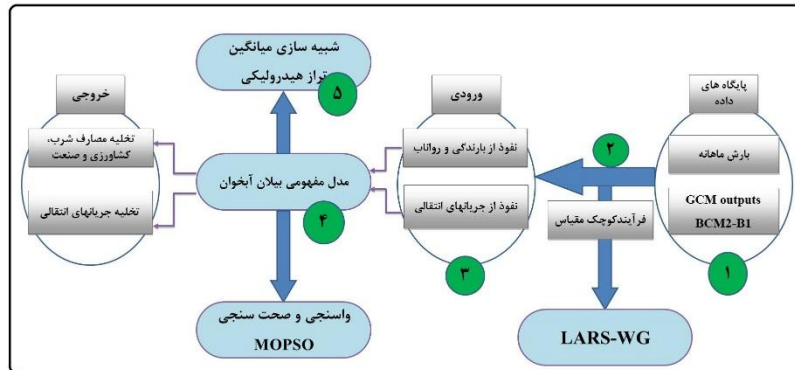
بعد از واسنجی و اطمینان از نتایج حاصل شده در مرحله‌ی صحت‌سنجی، تراز هیدرولکی آبخوان حدفاصل سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰ میلادی برآورد گردید. بارندگی به عنوان مهم‌ترین متغیر در معادله‌ی بیلان، توسط بهترین خروجی مدل‌های گردش عمومی برآورد می‌شود. میزان تخلیه از آبخوان را در کل بازه‌ی زمانی مطالعه شده یکسان فرض می‌کنیم. همچنین سایر اجزاء معادله‌ی مفهومی بیلان، که مشخصاً مربوط به شرایط زمین‌شناسی آبخوان

### اعمال شرایط خاتمه

از آنجا که ممکن است الگوریتم در پیدا کردن جواب بهینه به سمت یک بهینه‌ی موضعی متمایل شده و تا آخرین تکرار بهترین جواب الگوریتم ترقی نکند، از شرایط خاتمه استفاده شده است. شرایط خاتمه اعمال شده بدین شرح است که اگر بهترین جواب الگوریتم در ۳۰۰ تکرار اخیر بهبودی پیدا نکرد، الگوریتم از حلقه‌ی اصلی خود خارج شده و بهینه‌سازی پایان می‌یابد.

می‌دهد. لازم به ذکر است که کلیه مراحل فوق با برنامه‌نویسی در محیط MATLAB R2016a انجام شد.

هستند، ثابت در نظر گرفته شدند. بدین ترتیب، سطح آب زیرزمینی آبخوان به صورت ماهانه برآورد می‌شود. شکل (۲) مراحل مختلف روش کار در این پژوهش را نشان

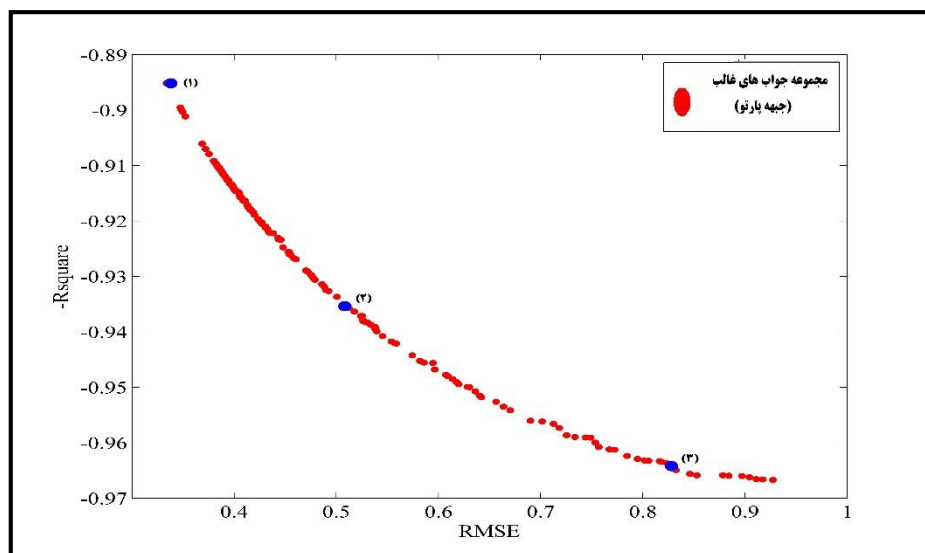


شکل ۲. چارچوب مراحل انجام شده در مطالعه

فراخوانی توابع هدف به دقت قابل قبولی رسید. همچنین، شکل (۳) به ترتیب وضعیت اعضای نامغلوب الگوریتم را نشان می‌دهد. بازه‌ی تغییرات توابع هدف اعضای نامغلوب بین ۱/۴ تا ۰/۲ برای تابع Z1 و بین ۰/۴ تا ۰/۹۷ برای تابع Z2 رسید که این موضوع نشان از توانمندی قابل ملاحظه‌ی الگوریتم MOPSO در پیدا کردن جوابهای بهینه دارد.

### بحث و نتایج

الگوریتم MOPSO با تعداد ۵۰۰ ذره، ۲۰۰۰ تکرار، مدت زمان ۸۵۷۷ ثانیه و با اعمال شرایط خاتمه به شرایط مزبور رسید. این الگوریتم با اعمال شرایط خاتمه، طی تعداد تکرارهای تعیین شده و با بیش از ۱ میلیون مرتبه



شکل ۳. موقعیت اعضای نامغلوب جمعیت در پایان بهینه‌سازی

درصد (نفوذ ۵ میلی‌متر از هر ۱۰۰ میلی‌متر بارش به آبخوان) برآورد شده است. این مقدار برای نفوذ بارندگی نشان دهنده‌ی بالا بودن ضریب CN و نفوذپذیری کم خاک منطقه است. میزان جبهه‌ی خروجی و تخلیه خالص (با کسر آب برگشتی به آبخوان از میزان تخلیه) ۱/۹ برابر

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص شده است، تعداد سه جواب از مجموعه جبهه‌ی پارتو انتخاب شدند. جدول (۴) مقادیر متغیر تصمیم را برای این سه جواب نشان می‌دهد. میزان نفوذ از رواناب حاصله بارندگی با توجه به وضعیت پوشش گیاهی و شرایط اقلیمی منطقه معادل ۵

مطالعه اکبرپور و همکاران (۱۳۹۱) نشان دهنده دقت مناسب الگوریتم در برآورد مقادیر است. در مطالعه اکبرپور و همکاران (۱۳۹۱) و گزارش بیلان دشت بیرجند صراحتاً به کسری مخزن قابل توجه آن دشت اشاره شده است. مقدار تغذیه و جبهه‌ی خروجی آبخوان به همراه ضریب ذخیره در گزارش بیلان منطقه به ترتیب برابر با ۲۹، ۱/۱۵ میلیون مترمکعب و ۰/۰۶ ذکر شده است. همچنین، درصد آب برگشتی به آبخوان برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد بیان شده است.

میزان جبهه‌ی ورودی به آبخوان است. البته این مقدار در فصول انتهایی و ابتدایی نسبت به فصول میانی سال کمتر شده و همین عامل موجب افزایش سطح آب زیرزمینی آبخوان در ابتدا و انتهای سال می‌شود. علت این امر می‌تواند افزایش بارش و کاهش تخلیه‌ی کشاورزی در منطقه باشد. ضریب ذخیره آبخوان حدود ۰/۰۶ تخمین زده شده است. این موضوع نشان می‌دهد که در ۱ متر مربع از سطح آبخوان، ۱ متر مکعب تخلیه یا تغذیه موجب کاهش و یا افزایش ۱۶ متری سطح آبخوان خواهد شد. مقایسه مقادیر بهینه با اعداد مندرج در گزارش بیلان آب دشت بیرجند و

جدول ۴. مقادیر متغیرهای تصمیم در جواب‌های منتخب

نام متغیر	جواب (۱)	جواب (۲)	جواب (۳)	واحد
جبهه‌ی ورودی	۲۲	۲۴/۰۴	۲۴	میلیون متر مکعب
نفوذ حاصل از بارندگی	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	درصد
میزان برگشت حاصل از کشاورزی - دامپروری	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۸	درصد
میزان برگشت حاصل از شرب - خدمات	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۴۹۲۱	درصد
میزان برگشت حاصل از صنعت	۰/۴	۰/۴	۰/۵	درصد
جبهه‌ی خروجی	۲/۷۵۸	۲/۳۱	۱/۷۱	میلیون متر مکعب
ضریب ذخیره	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	-
Z1 (RMSE)	۰/۸۲۸	۰/۵۱۲	۰/۳۳۸	متر
Z2 (R <sup>2</sup> )	۰/۹۶۴	۰/۹۳۵	۰/۸۹۵	-

الی ۱۳۹۳ برآورد شده و با آمار مشاهداتی در این سال‌ها مقایسه گردیدند. میزان دقت توابع هدف در این حالت برای تابع RMSE و R2 به ترتیب برابر است با ۰/۸۴ متر و ۰/۹۱. بعد از واسنجی و حصول اطمینان از دقت معادله‌ی مفهومی بیلان و کارایی الگوریتم بهینه‌سازی، اقدام به تخمین سطح آب زیرزمینی حدفاصل سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰ میلادی متناسب با بهترین خروجی مدل‌های گردش عمومی شد. شکل (۴) تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان را حدفاصل بازه مذکور نشان می‌دهد. بر اساس این شکل (۴)، حدفاصل سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان به طور کلی روند صعودی خواهد داشت و در ادامه روند تغییرات سطح آب زیرزمینی به صورت نزولی است. علت این امر بالا بودن مقدار بارندگی در این سال‌ها است. شکل (۵) تغییرات سالانه و میانگین متحرک ۲ ساله بارندگی ایستگاه سینوپتیک بیرجند ناشی از خروجی مدل BCM2 تحت سناریوی B1 را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است، بارندگی در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بیشتر از سال‌های

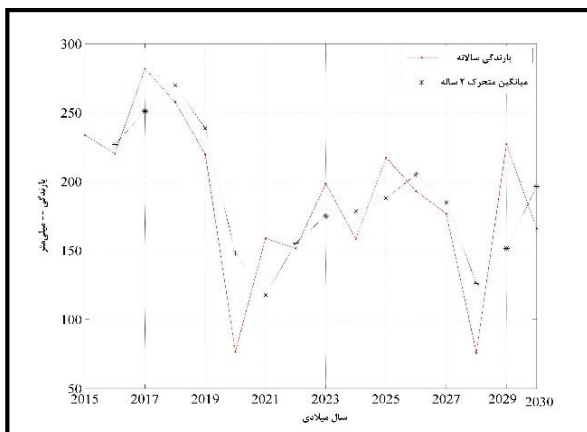
مقایسه‌ی مطالعات انجام شده در دشت بیرجند نشان می‌دهد که به لحاظ مقدار شاخص‌های ارزیابی تشابهات زیادی با مطالعه پیش‌رو وجود دارد. در مطالعه محتشمی و همکاران (۱۳۹۵) و محتشمی و همکاران، (۲۰۱۷) که به ترتیب با تمرکز درباره وضعیت ماندگار و غیر ماندگار آبخوان انجام شده‌اند، مقدار شاخص ارزیابی ریشه مربعات میانگین خطا به ترتیب ۰/۴۸۵ و ۰/۷ متر به دست آمد. مطالعه‌ی بنی‌هاشمی (۱۳۹۰) که با هدف مدل‌سازی جریان غیراشباع در محیط متخلخل با استفاده از مدل جبهه‌ی ورودی و خروجی با مطالعه‌ی پیش‌رو دارای تشابه است. به‌طوری‌که در مطالعه‌ی بنی‌هاشمی (۱۳۹۰) نیز مقدار جبهه‌ی ورودی به آبخوان بسیار بیشتر از جبهه‌ی خروجی است.

پس از واسنجی ضرایب و اجزاء معادله مدل مفهومی بیلان برای سال‌های ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۱ به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده و کارایی الگوریتم، به‌وسیله‌ی نتایج گام قبلی ارتفاع سطح آب آبخوان برای سال‌های ۱۳۹۲

توسعه، وضعیت سطح آب زیرزمینی آبخوان بدتر شده و روند نزولی به خود خواهد گرفت. افزون بر این، نتیجه‌ی مطالعه‌ی اکبرپور و همکاران (۱۳۹۱) نیز دلالت بر روند نزولی سطح آب زیرزمینی دارد. همچنین نتایج مطالعه موقیر و آجیور (۲۰۱۳) با نتایج این مطالعه یکسان است. آن‌ها در مطالعه‌ی خود از مدل Visual-MODFLOW به منظور برآورد اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آبخوان استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که در آینده میزان تغذیه آبخوان در منطقه نوار غزه کاهش می‌یابد. در نهایت باید به این نکته توجه اساسی شود که میزان خطای خروجی مدل‌های گردش عمومی به همراه آریبی موجود در فرایند ریزمقیاس نمایی به طور قابل توجهی بر نتایج تأثیر گذار خواهد بود. عمدتاً استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی عدم قطعیت قابل توجهی را به همراه دارد که بایستی در نتایج تحلیلی شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شود.

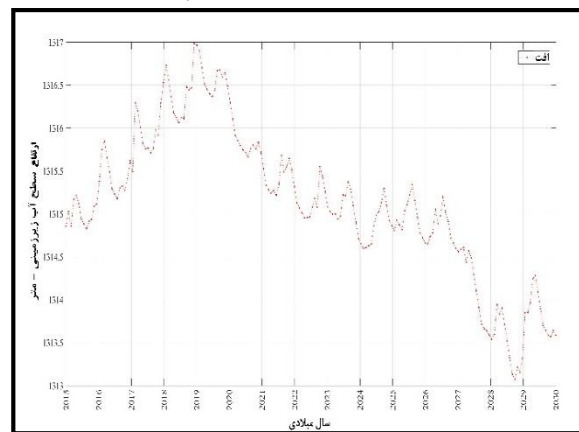
پیش‌رو است.

مجموع و میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی در بازه سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ میلادی به ترتیب ۳/۷۳ و ۰/۳۴ متر است که با مقدار افت دراز مدت سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند (معادل ۰/۴ متر در سال) همخوانی دارد. در نهایت، با در نظر گرفتن ضخامت لایه آبدار و وضعیت ارتفاعی آبخوان، می‌توان تا حدودی مناطق بحرانی را مشخص نمود. با توجه به وضعیت ارتفاعی سطح و کف آبخوان (شکل ۶)، و با در نظر گرفتن روند کاهش سطح آب زیرزمینی و تشدید آن در سال‌های بعدی، می‌توان این انتظار را داشت که مناطق غربی آبخوان با بحران مواجه شوند. نتایج مطالعه جعفرزاده و همکاران (۱۳۹۵) و مطالعه قوچانیان و همکاران (۲۰۱۳) با نتایج به‌دست آمده کاملاً همسو هستند. آن‌ها در مطالعه‌ی خود به بررسی اثرات توسعه‌ی طرح جمع‌ و تصفیه‌ی فاضلاب شهری بیرجند تحت تأثیر شرایط تغییر اقلیم پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان دادند که در آینده، و تحت هر کدام از حالت‌های



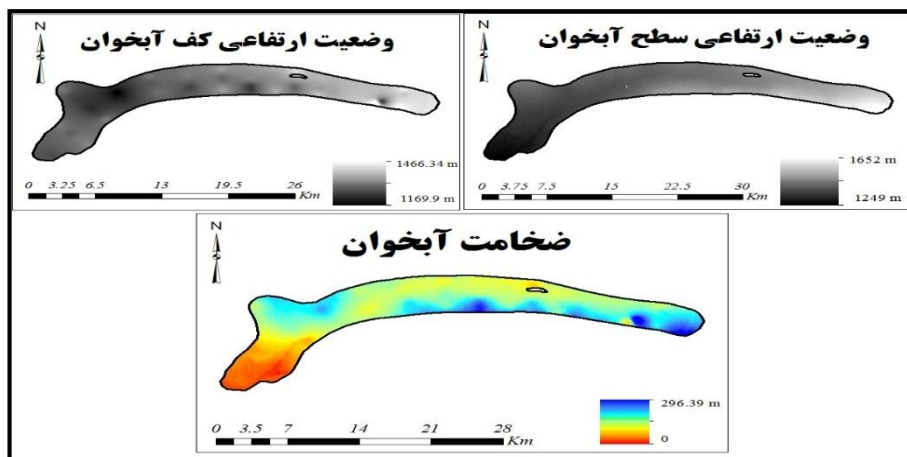
شکل ۵. تغییرات بارندگی خروجی مدل BCM2 تحت

سناریوی B1



شکل ۴. برآورد سطح آب زیرزمینی آبخوان حدفاصل

سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰ میلادی



شکل ۶. سنگ کف، ضخامت و ارتفاع سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت بیرجند

management with WEAP and MODFLOW models. 3th national conference on national conference on integrated water resources management, Sari, University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian).

2) Abbaspour, M., S. Mirbagheri, M. Monavvari, A. Javid & H. Zarei 2009. Conceptual hydrosalinity model for prediction of salt load from wastewater flows into soil and ground water. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 6, 359-368.

3) Akabrzadeh, Y., Eslahi, M., Sadegh. Sh, F, Babai, and M. 2013. Investigating the Effects of Climate Change on Groundwater Resources (Case Study: Soofi Chay Basin). Second Regional Conference on Climate Change and Earth' warming. (In Persian).

4) Banihashmi, A. 2011. Optimization and Calibration of Groundwater Dynamic Components Using GA Algorithm. Master's thesis. Department of Water Science and Engineering. Faculty of Agriculture, University of Birjand (In Persian).

5) Barron, O. V., Crosbie, R. S., Dawes, W. R., Charles, S. P., Pickett, T., & Donn, M. J. 2012. Climatic controls on diffuse groundwater recharge across Australia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(12), 4557-4570.

6) Castle, S. L., Thomas, B. F., Reager, J. T., Rodell, M., Swenson, S. C., & Famiglietti, J. S. 2014. Groundwater depletion during drought threatens future water security of the Colorado River Basin. *Geophysical Research Letters*, 41(16), 5904-5911.

7) Coello, C. C., & Lechuga, M. S. 2002. MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization. In *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No. 02TH8600) (Vol. 2, pp. 1051-1056). IEEE.*

8) Crosbie, R. S., McCallum, J. L., Walker, G. R., & Chiew, F. H. 2010. Modelling climate-change impacts on groundwater recharge in the Murray-

## نتیجه گیری

به جهت درک تغییرات و چگونگی رفتار جریان در آب زیرزمینی، تخمین رژیم جریان در آبخوان امری ضروری به حساب می آید. این مقوله به خصوص در مناطق خشک که بیشتر تکیه نیاز آبی بر آبهای زیرزمینی است، بیش از سایر مناطق دارای اهمیت است. این مطالعه با استفاده از معادله ی مفهومی بیلان آبخوان، مبادرت به تخمین تغییرات رفتار سطح ایستابی آب زیرزمینی نمود. در ابتدا و با استفاده از مقدار میانگین سطح ایستابی مشاهداتی چاه های مشاهده ای منتخب و با استفاده از الگوریتم MOPSO اقدام به واسنجی اجزاء معادله بیلان آبخوان شد. در این مرحله سطح ایستابی شبیه سازی شده در دو قسمت واسنجی و صحت سنجی، با مقدار مشاهداتی مقایسه شد. پس از حصول اطمینان از دقت معادله بیلان در تخمین مقدار سطح ایستابی و با استفاده از مقدار بارش خروجی مدل های گردش عمومی اقدام به پیش بینی سطح ایستابی حدفاصل سال های ۲۰۱۵ الی ۲۰۳۰ شد.

نتایج بررسی عملکرد سطح ایستابی شبیه سازی شده و مشاهداتی در آبخوان بیرجند نشان داد که ترکیب مدل مفهومی بیلان آبخوان در کنار یک ابزار بهینه سازی چند هدفه می توان به عنوان یک گزینه مناسب جهت ارزیابی رفتار آب زیرزمینی معرفی و در نظر گرفته شود. با توجه به مقادیر واسنجی شده مقاطع ورودی و خروجی آبخوان و حجم قابل توجه برداشت چاه های کشاورزی، صنعت و شرب انتظار می رود که وضعیت بیلان آبخوان دشت بیرجند به صورت نزولی و همراه با کسری مخزن

قابل توجه باشد. پیش بینی سطح ایستابی آب زیرزمینی در آینده نیز نشان می دهد که سطح ایستابی در آینده با روند نزولی همراه خواهد شد. البته به عنوان یک واقعیت غیر قابل انکار باید به عدم قطعیت بالای مدل های گردش عمومی و فرایند ریزمقیاس نمایی در خصوص برآورد مقادیر بارش نیز توجه شود. از این رو مطالعه فوق ضمن تأکید بر استفاده راحت و کاربردی مدل مفهومی پیشنهاد شده در خصوص بیلان آبخوان، بر وجود خطای قابل توجه مدل های گردش عمومی نیز تأکید می نماید.

## منابع

1) Akbarpour, A., Ghoochanian, E., Etebari, E. 2012. Integrating groundwater

- Birjand City, Iran). Theoretical and Applied Climatology, 1-12.
- 17) Jukić, D., & Denić-Jukić, V. 2009. Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model. Journal of hydrology, 373(3), 302-315.
- 18) Jyrkama, M. I., & Sykes, J. F. 2007. The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). Journal of Hydrology, 338(3), 237-250.
- 19) Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., & Uvo, C. B. 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. Journal of Hydrology, 518, 250-266.
- 20) Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Jimenez, B., Miller, K., ... & Shiklomanov, I. 2008. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management.
- 21) Kurdwani P. 1983. Resources and Water Issues in Iran: Agah Publishing (in Persian).
- 22) Luoma, S., & Okkonen, J. 2014. Impacts of future climate change and Baltic sea level rise on groundwater recharge, groundwater levels, and surface leakage in the Hanko aquifer in southern Finland. Water, 6(12), 3671-3700.
- 23) Mogheir Y, Ajjur S 2013. Effects of Climate Change on Groundwater Resources (Gaza Strip Case Study). International Journal of Sustainable Energy and Environment Vol. 1, No. 8, PP: 136- 149.
- 24) Mohtasham, M., Dehghani, A., Akbarpour, A., Meftah Halaghi, M. 2011. Prediction of water level in aquifer using GIS software. Case study: Birjand aquifer. 4th Conference on Water Resources Management, Tehran, Amirkabir University of Technology (in Persian).
- 25) Mohtashami, A., Akbarpour, A., Mollazadeh, M. 2017. Development of two dimensional groundwater flow simulation Darling Basin, Australia. Hydrogeology Journal, 18(7), 1639-1656.
- 9) Eberhart, R., and J., Kennedy. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. The Sixth International Symposium on Micromachining and Human Science, Nagoya, Japan, 1995, pp. 39-43.
- 10) Eckhardt, K., & Ulbrich, U. 2003. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. Journal of Hydrology, 284(1), 244-252.
- 11) Gates, J. B., Edmunds, W. M., Darling, W. G., Ma, J., Pang, Z., & Young, A. A. (2008). Conceptual model of recharge to southeastern Badain Jaran Desert groundwater and lakes from environmental tracers. Applied Geochemistry, 23(12), 3519-3534.
- 12) Ghoochanian, E., Etebari, B., & Akbarpour, A. 2013. Integrating groundwater management with WEAP and MODFLOW models (Case study: Birjand Plain, east of Iran). MODFLOW and More, 2-5.
- 13) Hashemi, H., Bertacchi Uvo, C., & Berndtsson, R. 2015. Coupled modeling approach to assess climate change impacts on groundwater recharge and adaptation in arid areas. Hydrology and Earth System Sciences, 19(10), 4165-4181.
- 14) Jackson C R, Meister R, Prudhomme c, 2011. Modelling the effects of climate change and its uncertainty on UK Chalk groundwater resources from an ensemble of global climate model projections. Journal of Hydrology 399 (2011) 12-28.
- 15) Jafarzadeh, A., Khaseii, A., Shahidi, A. 2016. Designing a multiobjective decision-making model to determine optimal crop pattern influenced by climate change phenomenon (case study: Birjand plain). Iranian Journal of Soil and Water Research, 47(4), 849-859 (In Persian).
- 16) Jafarzadeh, A., Pourreza-Bilondi, M., Afshar, A. A., Khashei-Siuki, A., & Yaghoobzadeh, M. 2018. Estimating the reliability of a rainwater catchment system using the output data of general circulation models for the future period (case study:

- Hydrology and Earth System Sciences, 16(12), 4499-4516.
- 34) Semenov, M. Barrow E. 1997. Use of a Stochastic Weather Generator in the Development of Climate Change Scenarios Climatic Change. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 35: 397-414.
- 35) Son, K., & Sivapalan, M. 2007. Improving model structure and reducing parameter uncertainty in conceptual water balance models through the use of auxiliary data. *Water resources research*, 43(1).
- 36) South Khorasan Regional Water Authority. 2016. Birjand's groundwater Balance report (in Persian).
- 37) Thomas, B. F., Behrangi, A., & Famiglietti, J. S. 2016. Precipitation intensity effects on groundwater recharge in the southwestern United States. *Water*, 8(3), 90.
- 38) Thompson J. R, Gavin H, Refsgaard A, Refstrup Sorenson H, Gowing D. J, 2009. Modelling the hydrological impacts of climate change on UK lowland wet grassland. *Wetlands Ecology and Management*, 17(5), 503-523.
- 39) Toews MW, Allen DM 2009. Simulated response of groundwater to predicted recharge in a semi-arid region using a scenario of modelled climate change. *Environmental Research Letters*, 4(3), 035003.
- 40) Touhami, I., E. Chirino, J. Andreu, J. Sánchez, H. Moutahir & J. Bellot 2015. Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain. *Journal of Hydrology*, 527, 619-629.
- 41) Wang, H., Gao, J. E., Zhang, M. J., Li, X. H., Zhang, S. L., & Jia, L. Z. 2015. Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model. *Catena*, 127, 80-91.
- 42) Wilks, D. 1992. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climate Change*, 22, 67-84
- model using meshless method based on MLS approximation function in unconfined aquifer in transient state. *Journal of Hydroinformatics*, 19(5), 640-652.
- 26) Mohtashami, A., Akbarpour, A., Mollazadeh, M. 2017. Modeling of groundwater flow in unconfined aquifer in steady state with meshless local Petrov-Galerkin. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 393-403, 2017 (in Persian).
- 27) Momeni, M. 2003. The role of climate change and its impact on ecological instability in Iran ", Third Regional and First National Conference on Climatology, Isfahan University (in Persian).
- 28) Parhizkari, M. 2019. Multi-objective operation optimization of hydropower reservoirs by MOPSO Case study: Karun Dam 5. *Iran Water Resources Research*, 15(1), 250-255.
- 29) Portmann, F. T., Döll, P., Eisner, S., & Flörke, M. (2013). Impact of climate change on renewable groundwater resources: assessing the benefits of avoided greenhouse gas emissions using selected CMIP5 climate projections. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024023.
- 30) Rojas, R., Feyen, L., & Dassargues, A. 2008. Conceptual model uncertainty in groundwater modeling: Combining generalized likelihood uncertainty estimation and Bayesian model averaging. *Water Resources Research*, 44(12).
- 31) Salami, H., Nassery, H., Massah Bavani, A. 2015. Probabilistic forecast of climate change effects on Hamadan-Bahar aquifer. *Water and Irrigation Management*, 5(1), 27-41 (In Persian).
- 32) Salehnia, N., Alizadeh, A., Sayari, N. 2014. Comparison of Two Downscaling Methods (LARS-WG and ASD) In Predicting Precipitation and Temperature under Climate Change in Different Climate. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(2), 233-245 (In Persian).
- 33) Sanchez f, Gunnink E, van Baaren S, Oude Essink G. H. P, Siemon B, Auken E, Elderhorst W, and de Louw P. G. B 2012. Modelling climate change effects on a Dutch coastal groundwater system using airborne electromagnetic measurements.

