

## ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب حوضه گرگانرود با استفاده از مدل‌های WEAP و MODFLOW

فروزان محمد میرزایی، مهدی ذاکری نیا\* و ابوطالب هزارجریبی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۱۳)

### چکیده

افزایش جمعیت، توسعه کشاورزی و کاهش منابع آب سطحی، باعث برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی شده است. از طرفی عدم توجه به تعادل میان برداشت و تغذیه آبخوان‌ها، افت سطح آب در آبخوان را به دنبال داشته است. برای آگاهی از رفتار سیستم آب زیرزمینی و وضعیت منابع و مصارف در حوضه و وضعیت تبادل آب در این دو بخش، می‌توان از اتصال مدل‌های معتبر آب سطحی و زیرزمینی استفاده کرد. هدف از این مطالعه شبیه‌سازی جریان آبخوان آزاد گرگانرود با استفاده از مدل آب زیرزمینی برای درک رفتار سیستم آب زیرزمینی در شرایط هیدرولوژی مختلف و ارائه راهکار مدیریتی برای بهبود وضعیت تأمین و تقاضا است. ابتدا وضعیت آبخوان مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات مورد نیاز موجود در منطقه به کمک مدل آب زیرزمینی MODFLOW شبیه‌سازی شد و سپس به منظور مدیریت تخصیص آب در منطقه مورد مطالعه، اطلاعات حاصل از مدل آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار LINK KITCHEN به مدل شبیه‌ساز و تخصیص منابع آب (WEAP) انتقال یافت. سناریوهای مختلف مدیریتی از جمله افزایش راندمان آبیاری، استفاده از پساب تصفیه‌خانه، کاهش دبی رودخانه در اثر تغییر اقلیم و ترکیبی از سناریوهای فوق برای برآورد میزان کاهش تقاضای آب در نظر گرفته شد. بر اساس این سناریوها، پیش‌بینی‌ها برای یک دوره ۲۰ ساله انجام و اثرات آن روی منابع آب حوضه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج واسنجی مدل MODFLOW نشان داد که انطباق قابل قبولی بین سطح ایستابی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده وجود دارد، به طوری که میزان RMSE برای جریان‌های ماندگار و غیرماندگار به ترتیب ۰/۹۷۲ و ۰/۹۷ به دست آمد. نتایج نشان داد که به کارگیری همزمان راهبردهای مختلف مدیریت مصرف آب، بهتر از سناریوی استفاده منفرد از هر کدام از آنها، برداشت آب از منابع مختلف را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: گرگانرود، بهره‌برداری تلفیقی، مدل WEAP, MODFLOW

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان  
\* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: a\_zakerinia@yahoo.com

## مقدمه

مدیریت منابع آب به‌عنوان اصلی‌ترین راهکار ممکن در جهت رفع معضلات ناشی از افت کمیت و کیفیت آب مطرح است. لذا طبیعت پیچیده مسائل آب نیازمند روش‌های جدیدی است که دیدگاه‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و منطقی را در یک قالب به هم پیوسته گردآوری کند. این تعریف در واقع مفهوم مدیریت جامع منابع آب است که اصلی‌ترین روش در راستای دستیابی به منابع پایدار آب در سطح ملی و بین‌المللی است (۲). مدیریت تخصیص آب با استفاده از روش تحلیل سناریوها و برنامه‌ریزی تکاملی، یکی از راه‌های مناسب برای بالا بردن ظرفیت تأمین آب و استفاده بهینه از آب موجود است یعنی با اعمال مدیریت مناسب بر سدهای موجود و مخازن زیرزمینی، اتخاذ سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از آنها و همچنین پیش‌بینی مناسب از میزان تقاضا در آینده، می‌توان بدون اجرای طرح‌های جدید، ظرفیت منابع آب موجود را با هزینه مناسب افزایش داده و خسارت ناشی از تخصیص نامناسب آب را کاهش داد (۱۵). با استفاده از مدل‌های ریاضی می‌توان داده‌های موجود را به ویژگی‌های عددی برای سیستم آب زیرزمینی تبدیل کرد. مدل ریاضی آب زیرزمینی، شبیه‌سازی یک سامانه هیدروژئولوژیکی است که از قوانین فیزیک و ریاضی کمک می‌گیرد. در این راستا برای مدل‌سازی آبخوان و سیستم‌های منابع آب ضروری است که از سامانه اطلاعات مکانی GIS استفاده شود تا اطلاعات ورودی و خروجی مدل را به صورت مدون و در قالب سطوح اطلاعات مختلف تهیه و ارائه کرد. معمولاً اطلاعات موجود قبل از استفاده در مدل‌های شبیه‌سازی نیاز به پیش‌پردازش و مدیریت دارد بنابراین استفاده از GIS جزء لاینفک شبیه‌سازی و مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب به حساب می‌آید.

راسکین و همکاران (۱۳) ارزیابی وضعیت موجود بیلان آب و استراتژی‌های مدیریتی از جمله تغییر الگوی مصرف، مدیریت بهتر سیستم و توسعه منابع جدی آب در دریاچه آرال را با استفاده از نرم‌افزار WEAP بررسی کردند. دکنداپا و همکاران

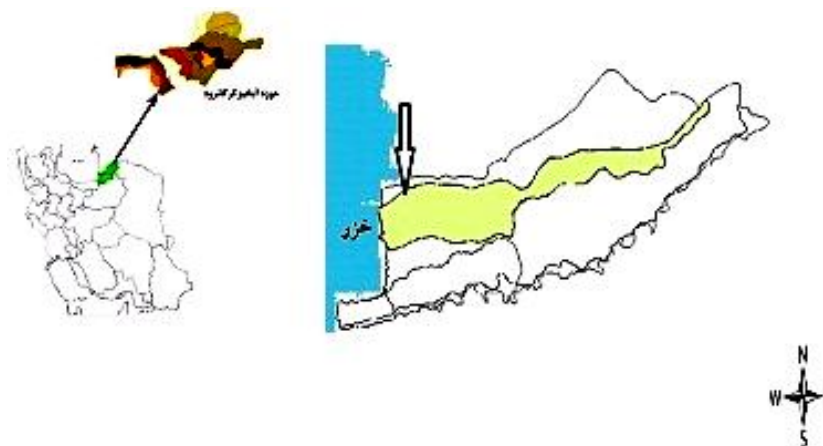
(۵) حوضه آبریز ولتا را با استفاده از نرم‌افزار WEAP شبیه‌سازی کردند. العمری و همکاران (۳) سناریوهای مختلف از جمله تأثیر طرح‌های توسعه‌ای و استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده را بر منابع آب و همچنین تأمین تقاضای بخش‌های مختلف حوضه عمان زرقا در اردن را با WEAP ارزیابی کردند. لارسن و همکاران (۱۱) برای رفع مشکل کاهش سطح آب در حوضه رودخانه آپراسینگ در کشور آمریکا از مدل MODFLOW برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی استفاده کردند و در نهایت اثرات تخصیص آب را به کمک مدل WEAP ارزیابی کردند. احمدی و همکاران (۱) برای شبیه‌سازی آبخوان‌های حوضه آبریز زاینده‌رود از مدل MODFLOW استفاده کردند و سپس برای ارزیابی اثرات سیاست‌های تفیقی استفاده از آب‌های سطحی و زیرزمینی مدل MODFLOW در WEAP را فراخوانی کردند. حجتی‌پور (۷) مصارف حوضه آبریز دشت بجنورد را با استفاده از اتصال دو مدل MODFLOW و WEAP شبیه‌سازی کردند. خادمی (۱۰) با به‌کارگیری مدل شبیه‌سازی MODFLOW و لینک آن به مدل WEAP مصارف و همچنین منابع آب دشت هراز را مورد ارزیابی قرار دادند.

هدف از این پژوهش شبیه‌سازی جریان آبخوان گرگان‌رود با استفاده از مدل آب زیرزمینی برای درک رفتار سیستم آب زیرزمینی در شرایط هیدرولوژی مختلف و ارائه راهکار مدیریتی برای بهبود وضعیت تأمین و تقاضا در حوضه گرگان‌رود، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های اقتصادی در شمال کشور است.

## مواد و روش‌ها

## موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در آبخوان آزاد پایاب گرگان‌رود در محدوده ۵۸° ۵۳' تا ۵۵° ۲۳' طول شرقی ۵۵° ۳۶' تا ۳۷° ۲۵' عرض شمالی به وسعت ۱۴۰۲ کیلومتر مربع انجام شده است و دارای حداقل ۲۶- و حداکثر ۱۰۱ متر ارتفاع از سطح دریا است. طول شاخه اصلی در این حوضه ۲۵۳ کیلومتر است. شکل (۱)



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی آبخوان پایاب گرگانرود در ایران و استان گلستان

در این پژوهش، هدف اصلی از مدل‌سازی حوضه گرگانرود، بررسی گزینه‌های مختلف مدیریت منابع آب تحت سناریوهای (۱) افزایش راندمان آبیاری، (۲) طرح احداث تصفیه‌خانه و (۳) تغییر اقلیم است. پس از تعیین هدف مدل‌سازی باید مدل مفهومی آبخوان را تهیه کرد. هدف از تهیه مدل مفهومی، ساده کردن شرایط واقعی مورد مطالعه و سازمان‌دهی داده‌های صحرائی به‌گونه‌ای که با استفاده از آن، سیستم مورد نظر راحت‌تر مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد (۴). ساختار مدل مفهومی آبخوان مورد مطالعه شامل، محدوده مدل‌سازی و توزیع اولیه پارامترهای هیدروژئولوژیکی (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه)، نرخ تخلیه چاه‌های بهره‌برداری و میزان آب برگشتی آنها به آبخوان، چاه‌های مشاهداتی، قنوات و چشمه‌ها، میزان تغذیه از سطح به آبخوان و شرایط مرزی است. با توجه به قابلیت بالای نرم‌افزار GIS در توانایی ارتباط با GIS است، در این مرحله کلیه نقشه‌های مورد نیاز برای ساخت مدل مفهومی با استفاده از GIS ساخته شده و در محیط GIS فراخوانی شده است. گفتنی است که به هنگام ساخت مدل مفهومی، اطلاعات مربوطه به‌صورت بسته‌های مختلف، از قبیل بسته مرز آبخوان، تغذیه، بسته تبخیر و تعرق، بسته چاه مشاهده‌ای و... به مدل وارد شوند.

#### طراحی و اجرای مدل MODFLOW

در مدل‌های عددی به‌منظور حل معادلات دیفرانسیل، یک شبکه

موقعیت حوضه مورد مطالعه را در کشور و استان گلستان نشان می‌دهد. مقدار نزولات منطقه از ۲۳۱ میلی‌متر تا ۶۷۹ میلی‌متر متغیر است. میانگین کمینه و بیشینه دمایی حوضه به ترتیب ۱۱ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد است.

#### آماده‌سازی اطلاعات ورودی مدل GIS با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS

به‌منظور مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال آن به مدل WEAP از نرم‌افزار GIS استفاده شده است که باید ابتدا اطلاعات ورودی آن پردازش شود. در این راستا داده‌ها و اطلاعاتی از جمله نقشه توپوگرافی، آمار بارندگی، نرخ تبخیر و تعرق از آب زیرزمینی، نقشه‌های قابلیت انتقال حاصل از آزمایش‌های پمپاژ، آمار رودخانه‌های موجود و آب‌های سطحی از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد. با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده، وسعت محدوده مورد مطالعه، تعداد لایه‌های آبدار موجود، ضخامت لایه‌ها، شرایط مرزی و مقادیر اولیه ضرایب هیدرودینامیکی و تقسیم‌بندی زمانی مشخص شد. تمامی این اطلاعات ورودی مورد تحلیل و پردازش قرار گرفت و خروجی آن در مدل آب زیرزمینی و سیستم مدیریت یکپارچه منابع آب مورد استفاده قرار گرفت. برخی از داده‌های ضروری برای شبیه‌سازی مدل MODFLOW و کاربرد آن در نرم‌افزار GIS در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. داده‌های ضروری برای شبیه‌سازی مدل MODFLOW

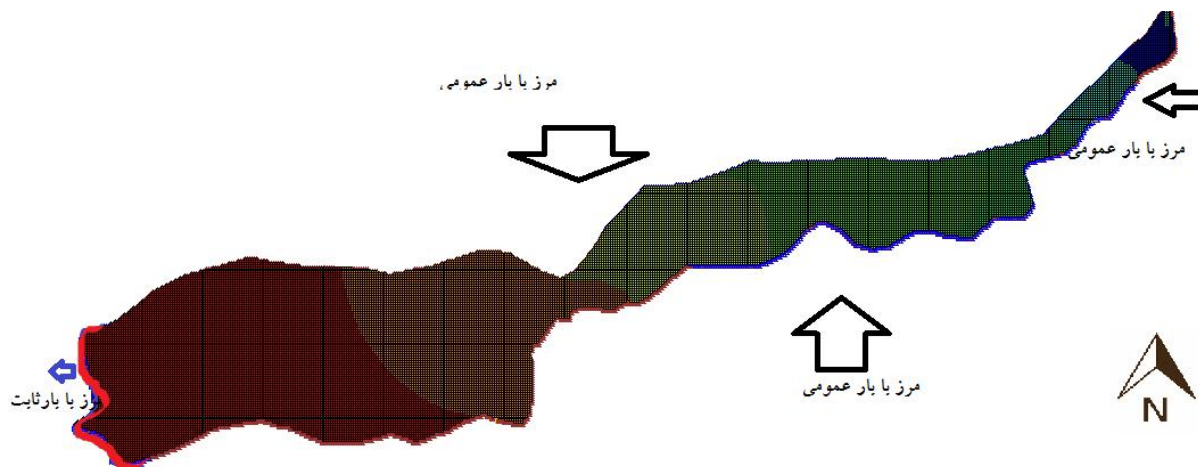
کاربرد در GMS	داده مورد نیاز
برای شبیه‌سازی Bottom Layers	لایه سنگ کف آبخوان
برای محاسبه هدایت هیدرولیکی	قابلیت انتقال
محاسبه Starting Head و شرایط مرزی آبخوان	آمار چاه‌های پیزومتری
برای محاسبه تغذیه و تخلیه آبخوان از طریق تبخیر و تعرق	آمار بارش و تبخیر و تعرق
برای تخمین زهکشی و تغذیه توسط رودخانه	آمار رودخانه
برای محاسبه نرخ تخلیه	اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری
برای شبیه‌سازی Top Layers	نقشه توپوگرافی

### پیکره بندی و آماده‌سازی مدل WEAP

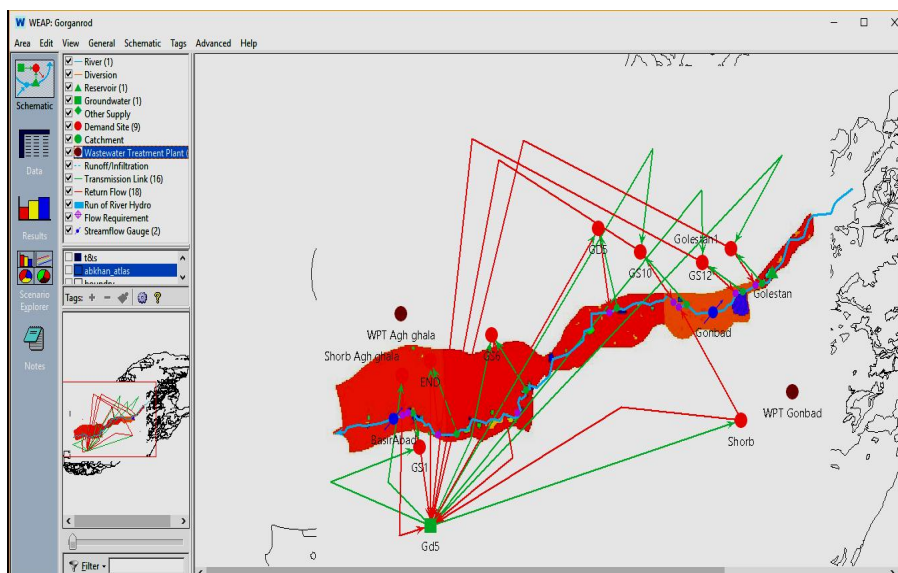
WEAP نرم‌افزاری برای برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب و ارزیابی پروژه‌های مهندسی آب است (۱۲). این مدل شامل ایستگاه‌های هیدرومتری بصیرآباد و گنبد، رودخانه دائمی (گرگان‌رود)، آبخوان زیرزمینی، نقاط نیاز (شرب و کشاورزی)، خطوط جریان آب برگشتی به رودخانه و آبخوان است (شکل ۳). در این تحقیق یک دوره آماری ۱۴ ساله از سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۳ برای شبیه‌سازی، واسنجی و بررسی اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. برای گره نیاز (شرب) مقدار تقاضای ماهانه در ۱۴ سال (۱۳۸۰-۱۳۹۴) به مدل وارد شد. آمار دبی ماهانه دو ایستگاه هیدرومتری بصیرآباد و گنبد مورد استفاده قرار گرفت. منابع تأمین کننده آب مورد نیاز حوضه شامل رودخانه گرگان‌رود و آبخوان زیرزمینی است. برای نیاز آبی کشاورزی با توجه به سطح زیرکشت و الگوی کشت محصولات غالب زراعی در کل دوره آماری ۱۴ ساله به صورت ماهیانه به عنوان Demand Site در مدل وارد شد. سیستم‌های آبیاری مورد استفاده در حوضه معمولاً به صورت سطحی و غرقابی است. برای ارزیابی کمی نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل از چهار شاخص ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (Rmse) ضریب نش - ساتکلیف (NSE) و شاخص تطابق خطا (d) استفاده می‌شود. ضریب تبیین نشان‌دهنده تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با استفاده از روش تجزیه رگرسیونی است. مقدار این شاخص بین صفر تا یک

روی منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود. در حوضه مورد مطالعه برای بررسی دقیق‌تر، ابعاد شبکه‌ها  $250 \times 250$  متر در نظر گرفته شد و در نتیجه شبکه‌بندی مدل شامل ۵۰۲ سطر و ۲۰۹ ستون شد. در شکل (۲) مرزهای هیدرولیکی آبخوان ارائه شده است.

پس از ساخت مدل مفهومی، حال شرایط مدل‌سازی آبخوان برای حالت پایدار فراهم می‌شود. در حالت پایدار با توجه به تأثیر بالای هدایت هیدرولیکی در کالیبراسیون مدل، مقادیر این پارامتر تغییر داده شد. پارامترهای دیگر مدل نظیر تغذیه نیز در طول فرایند کالیبراسیون تغییر داده شدند تا برازش مناسبی بین بار هیدرولیکی محاسبه شده و مشاهداتی به دست آید. بعد از چندین مرتبه اجرای مدل و کالیبره کردن پارامتر هدایت هیدرولیکی در حالت پایدار، حال مدل با حفظ شرایط فعلی برای شبیه‌سازی در حالت ناپایدار آماده می‌شود. در شرایط پایدار، مدل برای یک دوره تنش یک‌ماهه (آبان ۱۳۹۱) شبیه‌سازی شده است. در شرایط ناپایدار، مدل با هدف بهینه‌سازی ضریب آبدهی ویژه، در یک دوره زمانی ۱۲ ماهه (آذر ۱۳۹۱ تا آبان ۱۳۹۲) اجرا شد. در این شرایط برای انجام مدل‌سازی باید کلیه داده‌های مورد نیاز وابسته به زمان در مدل‌سازی ناپایدار از جمله مقادیر تخلیه چاه‌های بهره‌برداری، تراز چاه‌های مشاهده‌ای و میزان تغذیه و تبخیر در منطقه را به صورت یک دوره ۱۲ ماهه در گام‌های زمانی یک ماهه به مدل معرفی کرد.



شکل ۲. شرایط مرزی آبخوان گرگانرود



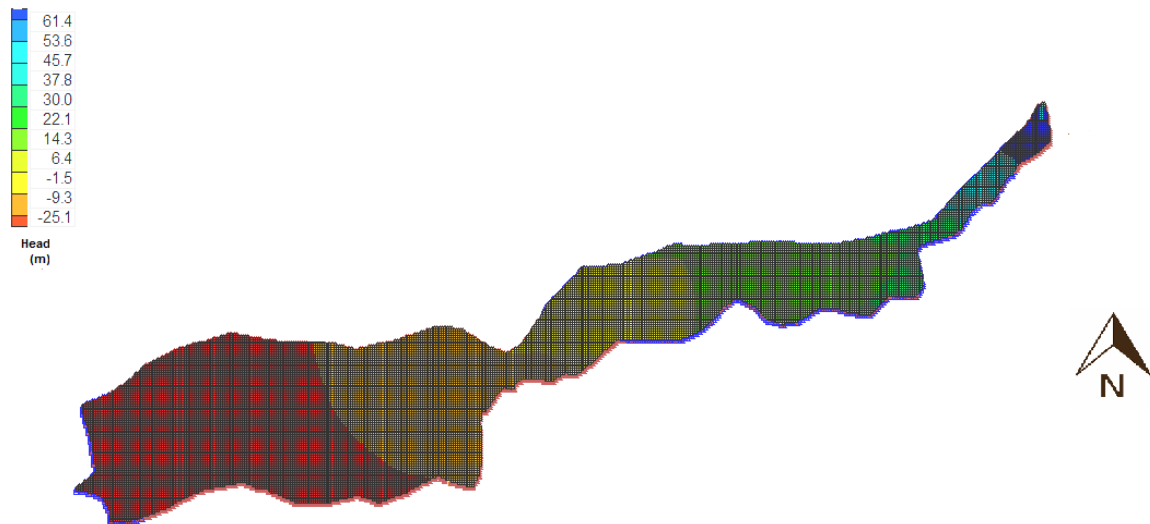
شکل ۳. شکل نمادین نیازها، منابع و روابط بین مصارف و منابع در منطقه مورد مطالعه

## نتایج و بحث

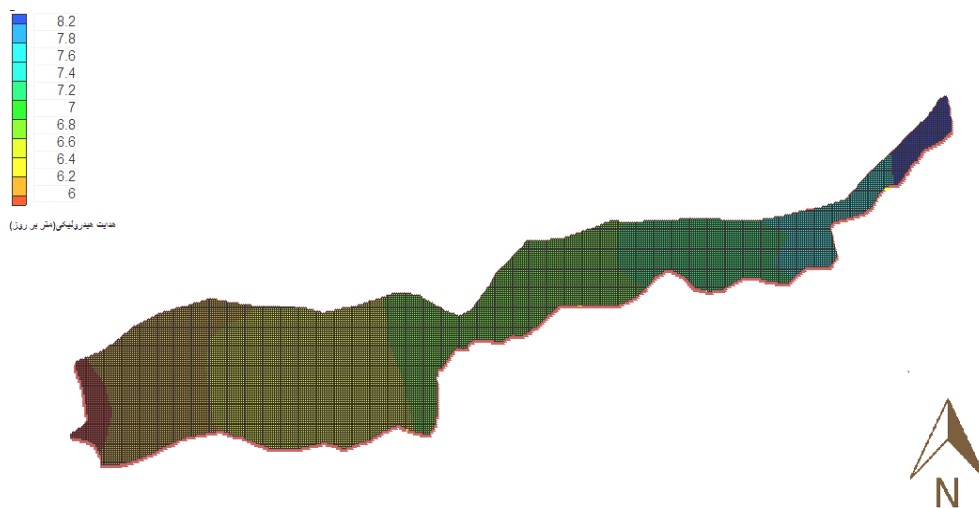
### اجرای مدل MODFLOW

در این پژوهش هدف از کالیبراسیون، رساندن اختلاف بین سطح ایستابی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به کمتر از یک متر است. کالیبراسیون را می‌توان به دو صورت دستی و خودکار (PEST) انجام داد. برای کالیبراسیون مدل در شرایط ماندگار، رژیم جریان آب زیرزمینی به صورت پایدار در نظر گرفته شد تا به حدود ضریب هدایت هیدرولیکی سفره دست پیدا کرد. تغذیه نیز در طول فرایند کالیبراسیون به صورت بسیار جزئی تغییر داده

متغیر است و مقادیر بالای ۵٪ قابل قبول است. ضریب نش- ساتکلیف اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و مقدار این شاخص از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است. مقدار شاخص تطابق از صفر تا یک متغیر است و مقادیر بزرگ‌تر آن نشان‌دهنده تطابق بهتر بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. گام مهم و دقیق پس از دو مدل ساخته شده، تعیین نحوه ارتباط مراکز نیاز و منابع تأمین آب در WEAP و سلول‌های MODFLOW است. به دلیل اهمیت این مرحله، از نرم‌افزار link kitchen استفاده شده است



شکل ۴. نقشه سطح ایستابی شبیه‌سازی شده در شرایط پایدار



شکل ۵. هدایت هیدرولیکی واسنجی شده در شرایط پایدار برحسب (متر بر روز)

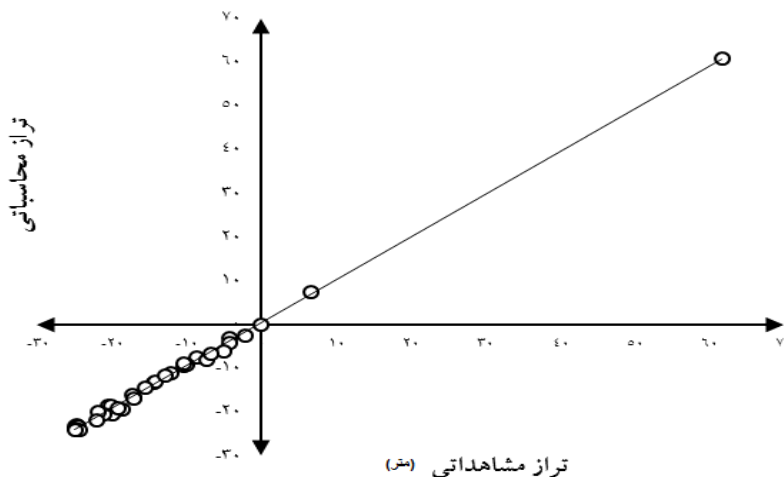
آبخوان را نشان می‌دهد.

معیارهای ارزیابی دقت مدل در دوره واسنجی در شرایط ماندگار در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین نمودار تراز سطح آب زیرزمینی محاسباتی در برابر مقادیر مشاهداتی در دوره واسنجی شرایط پایدار در شکل (۶) ارائه شده است. بررسی شکل (۶) و جدول (۲) نشان می‌دهد که مدل از دقت مناسب در دوره واسنجی (شرایط پایدار) برخوردار بوده است و تطابق مناسبی بین تراز سطح آب زیرزمینی محاسباتی و مشاهداتی در پیزومترهای مورد بررسی وجود دارد. در کالیبراسیون شرایط ناپایدار تمرکز اصلی مدل، واسنجی

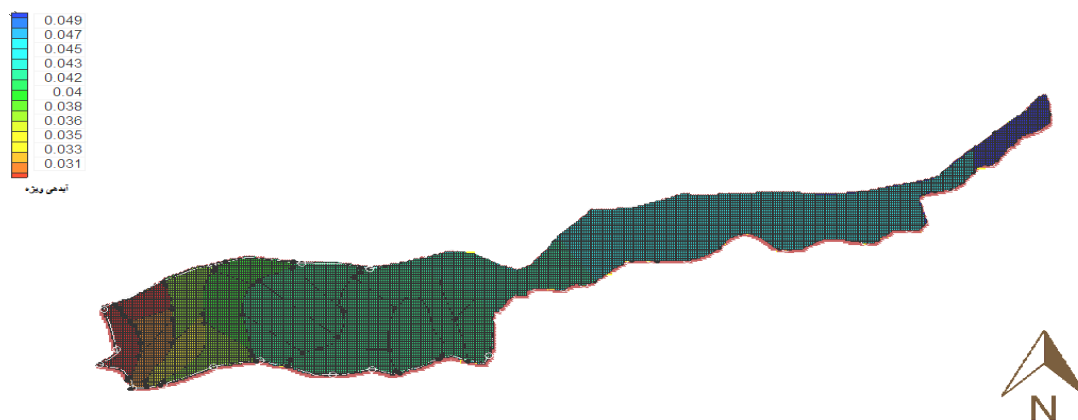
شد. واسنجی به صورت دستی انجام شد، بیش از ۱۰۰ مرتبه پارامترهای گفته شده تغییر داده شدند تا برازش مناسبی بین بارهای هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی حاصل شود. شکل (۴) نتیجه واسنجی در شرایط پایدار را نشان می‌دهد با توجه به شکل، تراز هد محاسباتی از شرق به غرب دارای روند کاهشی است. هدایت هیدرولیکی واسنجی شده در آبخوان دارای مقادیر متفاوتی بین ۶ تا ۸/۴ متر بر روز است، حداقل هدایت هیدرولیکی در نزدیکی سواحل دریای خزر (غرب حوضه) و حداکثر آن در قسمت ورودی آبخوان (نواحی شرقی) است. شکل (۵) توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی واسنجی شده در

جدول ۲. معیارهای ارزیابی خطا در دوره‌های واسنجی

Mean Error	Mean Abs. Error	Root Mean Sq. Error	دوره واسنجی
-۰/۵۳	۰/۸۱	۰/۹۷۲	دوره پایدار
-۰/۳۹	۰/۸۴	۰/۹۷	دوره ناپایدار



شکل ۶. نمودار بار هیدرولیکی محاسباتی - مشاهداتی در حالت پایدار



شکل ۷. نقشه مقادیر واسنجی شده آبدهی ویژه آبخوان گرگانرود

مقادیر واسنجی شده آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد که آبدهی ویژه از تغییرپذیری کمتری نسبت به هدایت هیدرولیکی در سطح آبخوان برخوردار است.

#### اجرای مدل WEAP

در این تحقیق پارامترهای ماهانه نیاز آبی کشاورزی در هر

مقادیر آبدهی ویژه است، به روش دستی طی چندین مرتبه اجرای مدل، این ضریب کالیبره شد. شکل (۷) نحوه توزیع مقادیر آبدهی ویژه در آبخوان را نشان می‌دهد، با توجه به شکل، آبدهی ویژه از الگویی مانند هدایت هیدرولیکی برخوردار است به طوری که در نواحی غربی دشت دارای مقدار حداقل ۰/۰۳۱ و در نواحی شرقی دارای مقادیر حداکثر ۰/۰۴۹ است. همچنین مقایسه

جدول ۳. مقادیر پارامترها قبل از واسنجی مدل برای مصارف مختلف در حوضه گرگانرود

درصد آب برگشتی به		درصد مصرف آب	اولویت تقاضا	میانگین نرخ نیاز سالانه آب در هر هکتار (متر مکعب، برای اراضی کشاورزی) - هر نفر (لیتر بر روز، برای شرب)	پارامترها
رودخانه	آبخوان				
۶۰	۴۰	۷۰	۲	۷۹۰۲	کشاورزی یک
۶۰	۴۰	۷۰	۲	۶۵۶۱	کشاورزی دو
۶۰	۴۰	۷۰	۲	۵۶۵۹	کشاورزی سه
۶۰	۴۰	۷۰	۲	۶۷۷۹	کشاورزی چهار
۶۰	۴۰	۷۰	۲	۸۰۸۴	کشاورزی پنج
۶۰	۴۰	۷۰	۲	۵۴۳۷	کشاورزی شش
۶۰	۴۰	۷۰	۲	۶۶۹۶	کشاورزی هفت
۴۵	۵۵	۲۰	۱	۹۰۰	نیاز شرب

جدول ۴. مقادیر پارامترها بعد از واسنجی مدل برای مصارف مختلف در حوضه گرگانرود

درصد آب برگشتی به		درصد مصرف آب	اولویت تقاضا	میانگین نرخ نیاز سالانه آب در هر هکتار (برای اراضی کشاورزی) - هر نفر (برای شرب)	پارامترها
رودخانه	آبخوان				
۶۸	۳۳	۶۷	۲	۷۱۰۸	کشاورزی یک
۶۵	۳۵	۶۶	۲	۵۸۸۱	کشاورزی دو
۶۵	۳۵	۶۸	۲	۵۰۰۹	کشاورزی سه
۶۱	۳۹	۷۰	۲	۶۱۲۲	کشاورزی چهار
۶۲	۳۸	۷۱	۲	۷۳۶۹	کشاورزی پنج
۵۳	۴۷	۷۵	۲	۴۸۰۹	کشاورزی شش
۵۸	۴۲	۷۶	۲	۵۸۸۴	کشاورزی هفت
۳۶	۶۴	۲۴	۱	۷۸۹	نیاز شرب

شاخص‌های مربوط به ارزیابی کمی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای هر ایستگاه هیدرومتری در جدول (۵) ارائه شده است.

مقادیر شاخص‌های آماری در دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل دارای دقت قابل قبول در شبیه‌سازی است - این نتایج با نتایج دکن‌دایا و همکاران (۵) که ضریب نش-ساتکلیف را برای ایستگاه‌های هیدرومتری در حوضه آبریز ولتا بین ۰/۵۶ تا ۰/۸۶ به دست آوردند در توافق است. ویژگی

هکتار، اولویت‌بندی تقاضا، درصد مصرف آب کشاورزی و همچنین درصد آب‌های برگشتی به آبخوان و رودخانه گرگانرود توسط نرم‌افزار weap با روش PEST برای دو ایستگاه هیدرومتری گنبد و بصیرآباد واسنجی شد. واسنجی مدل از ایستگاه هیدرومتری بالادست (گنبد) به سمت پایین دست حوضه (بصیرآباد) انجام گرفت. مقادیر پارامترها قبل از واسنجی مدل در جدول (۳) و همچنین مقادیر پارامترها بعد از واسنجی مدل در جدول (۴) ارائه شده است. مقادیر آماری و



جدول ۵. شاخص‌های ارزیابی مدل برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

بصیرآباد	گنبد	آمار / ایستگاه هیدرومتری
دوره واسنجی		
۱۲۰	۱۲۰	تعداد ماه‌ها
۶/۸۱	۵/۲۹	میانگین دبی مشاهداتی (m <sup>3</sup> /s)
۶/۱۹	۴/۹۰	میانگین دبی شبیه‌سازی شده (m <sup>3</sup> /s)
۰/۸۳	۰/۸۸	R <sup>2</sup>
۰/۱۸	۰/۱۴	RMSE
۰/۷۸	۰/۸۱	NSE
۰/۸۹	۰/۹۱	D
دوره اعتبارسنجی		
۴۸	۴۸	تعداد ماه‌ها
۵/۱۲	۴/۰۶	میانگین دبی مشاهداتی (m <sup>3</sup> /s)
۴/۸۸	۳/۹۱	میانگین دبی شبیه‌سازی شده (m <sup>3</sup> /s)
۰/۸۵	۰/۸۹	R <sup>2</sup>
۰/۴۶	۰/۴۰	RMSE
۰/۷۹	۰/۸۰	NSE
۰/۹۱	۰/۹۰	D

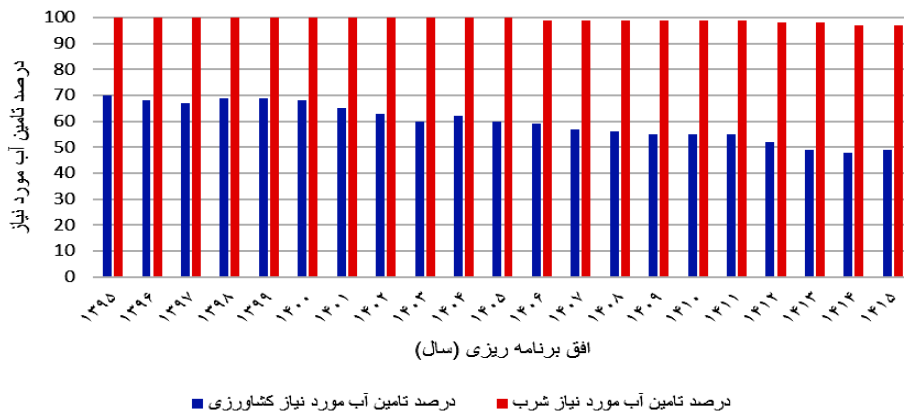
درصد تأمین تقاضا برای این سناریو در شکل (۸) ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده در جدول (۶) آینده با ادامه روند کنونی با مشکل عدم تأمین آب مورد نیاز در دو بخش شرب و کشاورزی مواجه خواهیم بود. این نتایج با نتایج خادمی (۱۰) که با ادامه وضعیت برداشت کنونی در دشت هراز طی دوره ۱۰ ساله آینده که با کمبود آب مواجه شد، در توافق است.

**\* سناریوی دوم: تأثیر افزایش راندمان آبیاری به کمک توسعه روش‌های نوین آبیاری با فرض ثبات سطح زیر کشت**  
در این سناریو فرض شده است راندمان آب در اراضی کشاورزی منطقه در طول سال‌های شبیه‌سازی به کمک اقداماتی از قبیل توسعه روش‌های آبیاری تحت فشار، پوشش کانال‌های انتقال آب، تسطیح اراضی تحت پوشش آبیاری سطحی و غیره افزایش پیدا می‌کند، اما سطح زیر کشت تغییری نخواهد کرد. در

مهم نرم‌افزار WEAP که باعث شده به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت منابع آب در نظر گرفته شود، توانایی بسیار بالا در ایجاد سناریوها و تولید خروجی‌های مناسب و قابل تفسیر است. با توجه به این ویژگی در این پژوهش پنج سناریو تعریف شده است.

#### سناریوی اول: سناریوی مرجع

سناریوی مرجع بیانگر ادامه وضعیت موجود بدون تغییر اساسی در سیاست‌های مدیریتی در آینده است. در این سناریو که پایه همه سناریوهای دیگر است، تنها رشد جمعیت منطقه و رشد کشاورزی تا سال ۱۴۱۵ با نرخ رشد کنونی لحاظ خواهد شد و بقیه پارامترها تا سال آخر شبیه‌سازی بدون تغییر باقی می‌ماند. در این سناریو فرض بر این است که اقلیم منطقه (آورد رودخانه) در سال‌های آینده تکرار توالی ۲۰ سال گذشته است.



شکل ۸. درصد تامین آب در بخش‌های شرب و کشاورزی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

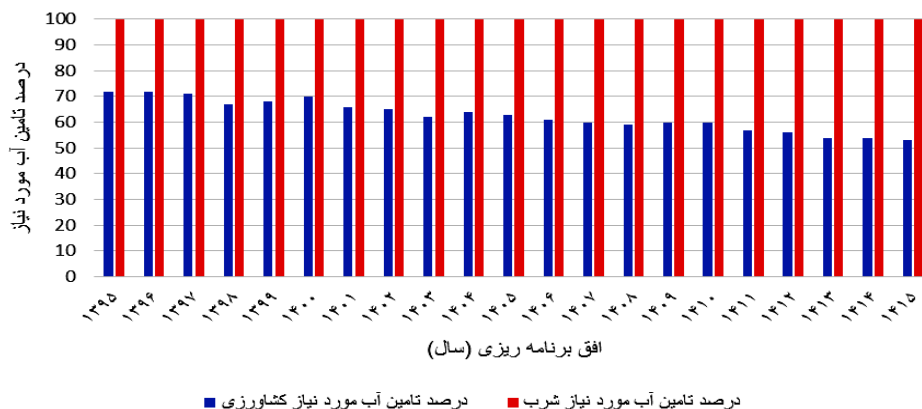
جدول ۶. نتایج سناریوی مرجع (واحد حجم برحسب میلیون متر مکعب)

شاخص اعتمادپذیری (%)		حجم کل آب تأمین نشده	
شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی
۵۶/۴	۵۱/۳	۲۳/۷۶	۵۲۲۸
میانگین افت سالانه آبخوان		حجم آب برگشتی به آبخوان	
آبخوان گرگان‌رود		شرب	کشاورزی
۷/۴		۳۸۹	۲۴۷۳

حفر می‌شوند، برای آبخوان‌ها به صورت منبع تغذیه کننده عمل کرده و پساب شهری از طریق این چاه‌ها به داخل آبخوان نفوذ کرده و آن را تغذیه می‌کنند. در این تحقیق در ابتدا فاضلاب شهرهای گنبد، آق قلا و سیمین‌شهر به‌طور مستقیم به داخل آبخوان و رودخانه گرگان‌رود برگشت داده شده است. طبق اطلاعات به‌دست آمده یک تصفیه‌خانه در محدوده شهر گنبد در حال اجرا است. طرح احداث تصفیه‌خانه دیگری برای تصفیه پساب شهری آق قلا نیز در دست مطالعه است. در این سناریو فرض بر این شد که این دو تصفیه‌خانه در محدوده شهرهای مورد نظر (شهر گنبد، بالادست ایستگاه هیدرومتری گنبد و شهر آق قلا، بالادست ایستگاه بصیرآباد) احداث و مورد بهره‌برداری قرار خواهند گرفت و از آب تصفیه شده آنها به عنوان یک منبع نامتعارف آب سطحی در بخش کشاورزی (آبیاری اراضی آبی) استفاده شود. البته لازم به ذکر است که ۴۰ درصد از آب خروجی هر کدام از تصفیه‌خانه‌ها به منظور تأمین

این تحقیق بر اساس مطالعات صورت گرفته میزان افزایش راندمان کل آبیاری در اراضی آبی پنج درصد در نظر گرفته شد. با توجه به جدول (۷) نیاز تأمین نشده آبیاری به ۴۳۹۷ میلیون مترمکعب کاهش یافته است، بنابراین با توجه به شکل (۹) افزایش راندمان آبیاری با کاهش تقاضای تأمین نشده همراه خواهد بود. این نتایج در توافق با نتایج حجی‌پور (۷) که با افزایش ۶۰ درصد راندمان آبیاری از کاهش کسری مخزن آب زیرزمینی و همچنین کاهش افت سطح آب زیرزمینی جلوگیری می‌شود و همچنین با نتایج گازرانی (۶) که با افزایش ۲۰ درصدی راندمان آبیاری در بخشی از حوضه کشف رود، منجر به کاهش تقاضای آب مورد نیاز کشاورزی و در پی آن کاهش ۴۷ درصدی افت سطح آب زیرزمینی شد در توافق است.

\* سناریوی سوم: سناریوی استفاده از آب نامتعارف سطحی چاه‌های جذبی که برای دفع فاضلاب شهری در محدوده شهرها



شکل ۹. درصد تامین آب در بخش کشاورزی و شرب در اثر اعمال سناریوی افزایش راندمان آبیاری (رنگی در نسخه الکترونیکی)

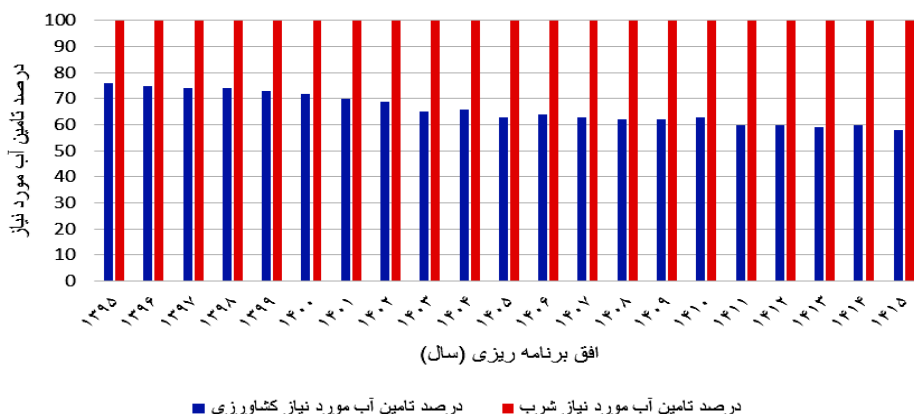
جدول ۷. نتایج سناریوی افزایش راندمان آبیاری (واحد حجم برحسب میلیون متر مکعب)

شاخص اعتماد پذیری (%)		حجم کل آب تامین نشده	
کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب
۵۹/۴	۱۰۰	۴۳۹۷	۰
میانگین افت سالانه آبخوان		حجم آب برگشتی به آبخوان	
آبخوان گرگانرود	شرب	کشاورزی	شرب
۲/۷	۳۰۹	۲۵۱۰	۳۰۹

شد و کاهش در تغذیه باعث فروافتادن تراز سطح آب زیرزمینی شده است.

**\* سناریوی چهارم: کاهش دبی رودخانه متأثر از تغییر اقلیم**  
تغییر اقلیم بدون تردید یکی از چالش‌های بسیار مهم است که در مقیاس جهانی رخ می‌دهد و دارای اثرات مهمی بر حوضه‌های آبریز به‌ویژه در بخش منابع آب دارد. با توجه به اینکه مسئله تغییر اقلیم در سال‌های اخیر نمود بیشتری پیدا کرده است، شرایط اقلیمی گرم‌تر باعث تشدید چرخه آب، تغییر بارش و تغییر در مقدار و زمان ظهور رواناب می‌شود. بر این اساس ضمن بیان اهمیت تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب در حوضه، بررسی و ارزیابی تأثیرات کاهش دبی رودخانه گرگانرود ناشی از تغییر اقلیم و کاهش بارندگی، بر وضعیت آب زیرزمینی و همچنین تأمین تقاضای مصارف مختلف در منطقه لازم و ضروری می‌شود. بنابراین با استفاده از نتایج

بخشی از نیاز آبی اراضی زراعی مورد استفاده قرار گرفت. با اجرای این سناریو ۱۷/۸ درصد از تغذیه آبخوان کاهش یافت. کاهش تغذیه در آبخوان مورد مطالعه باعث افت تراز سطح آب زیرزمینی خواهد شد. اما به دلیل اینکه بخشی از نیاز آبی اراضی زراعی از طریق منبع جدید تامین آب (آب نامتعارف سطحی) تامین شده است؛ وضعیت آبخوان در نتیجه اعمال این سناریو در مقایسه با سناریو مرجع بهبود یافته است. با اجرای این سناریو کمبود در تامین آب شرب شهری رخ نخواهد داد و در بخش کشاورزی درصد تامین آب نسبت به سناریوی مرجع افزایش یافته است (شکل ۱۰). همچنین سایر نتایج این سناریو در جدول (۸) بیان شده است. این نتایج در توافق با نتایج پژوهش جعفری (۹) که با استفاده از شبیه‌سازی آب زیرزمینی در دشت بجنورد به این نتیجه رسید که با فرض اجرای سیستم جمع‌آوری فاضلاب و حذف چاه‌های جذبی در دشت بجنورد، ۴۳ درصد از میزان تغذیه آب زیرزمینی کاسته



شکل ۱۰. درصد تأمین نیاز مصارف مختلف بر اثر سناریوی استفاده از منبع آب نامتعارف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۸. نتایج سناریوی استفاده از آب نامتعارف (واحد حجم برحسب میلیون متر مکعب)

شاخص اعتمادپذیری (%)		حجم کل آب تأمین نشده	
کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب
۵۴	۱۰۰	۴۱۴۵	۰
میانگین افت سالانه آبخوان		حجم آب برگشتی به آبخوان	
آبخوان گرگانرود		کشاورزی	شرب
۳/۱		۲۲۳۸	۲۷۰

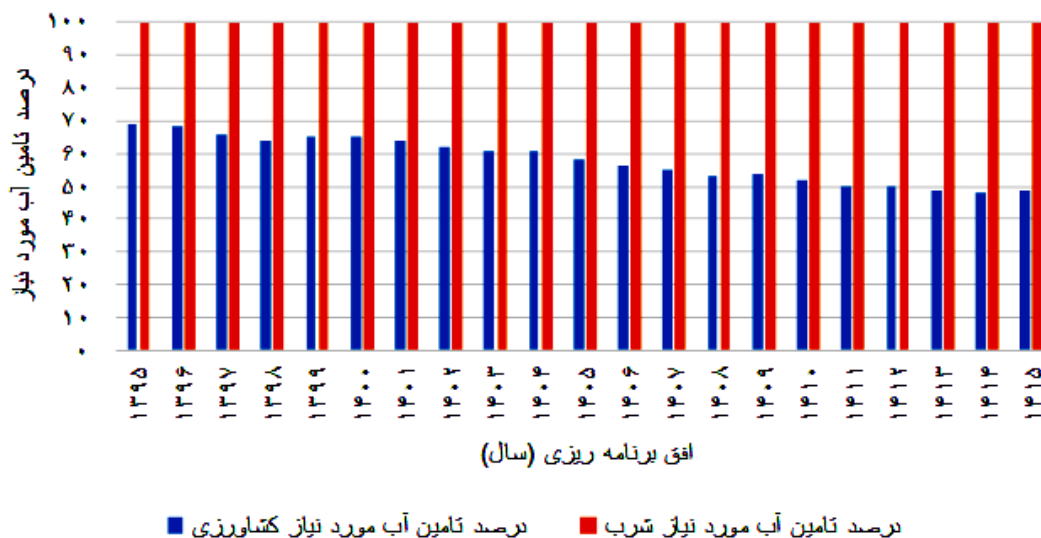
آبیاری بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که سناریوهای تغییر آب و هوا، بیشترین تأثیر منفی را در تأمین آب در بخش کشاورزی دارند و همچنین با نتایج هولرمن و همکاران (۸) که در حوضه اومه-بونو، با استفاده از مدل weap سناریوهای مختلف تغییر اقلیم را تا سال ۲۰۲۵ تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که علاوه بر افزایش فشار روی منابع آب زیرزمینی بنین، برداشت از آب سطحی نیز بیشتر خواهد شد، در توافق است.

**\* سناریوی پنجم: سناریوی ترکیبی بررسی همزمان افزایش راندمان و بهره‌برداری از منبع آب نامتعارف سطحی (تصفیه خانه فاضلاب)**

این سناریو به منظور بررسی همزمان دو راهکار مدیریتی (مدیریت عرضه و تقاضا) تدوین شده و مدل بر اساس آن تغییر داده شد. طبق نتایج این سناریو درصد تأمین آب برای

به دست آمده از تحقیقات انجام شده توسط محققین و همچنین کاهش ۱۷ درصدی بارش در سال‌های اخیر در این حوضه (طبق اطلاعات به دست آمده از مرکز هواشناسی)، این سناریو با فرض کاهش ۲۰ درصدی در میزان آورد رودخانه گرگانرود تعریف شد و نتایج به دست آمده در این شرایط مورد ارزیابی قرار گرفت.

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود درصد تأمین آب مورد نیاز کشاورزی نسبت به سناریوی مرجع نیز کمتر شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۹) کاهش دبی رودخانه باعث افزایش برداشت از منبع آب زیرزمینی شده است و افت تراز سطح آب زیرزمینی را به دنبال داشته است. میانگین افت حجم سالانه آب زیرزمینی به دنبال اجرای این سناریو به میزان ۴/۳ میلیون مترمکعب برآورد شده است. نتایج به دست آمده در این سناریو در توافق با پژوهش سانچز و همکاران (۱۴) که در رودخانه‌ای از مکزیک تأثیر تغییر اقلیم را بر نیاز



شکل ۱۱. درصد تامین نیاز مصارف مختلف در حوضه گرگانرود در اثر تغییر اقلیم (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۹. نتایج سناریوی کاهش دبی رودخانه گرگانرود (واحد حجم بر حسب میلیون مترمکعب)

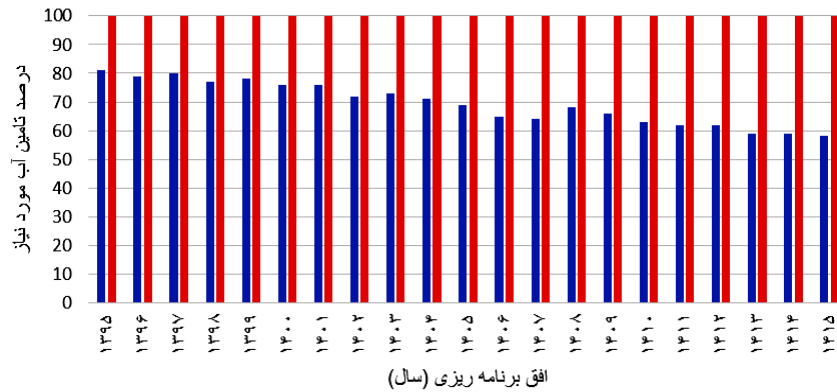
شاخص اعتمادپذیری (%)		حجم کل آب تامین نشده	
کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب
۴۸۹۶	۰	۵۳/۱	۱۰۰
حجم آب برگشتی به آبخوان		میانگین افت سالانه آبخوان	
کشاورزی	شرب	آبخوان گرگانرود	آبخوان
۲۷۵۵	۳۵۸	۴/۳	

کشاورزی به طور میانگین افزایش یافته است. وضعیت تامین آب مورد نیاز در بخش‌های مختلف، در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. با توجه به جدول (۱۰) در صورت اجرای سناریوی عنوان شده، میزان افت سالانه آبخوان در مقایسه با سناریوی مرجع به طور چشمگیری کاهش یافته است.

### نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بهره‌گیری از سیستم اطلاعات مکانی در شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی حوضه گرگانرود و بررسی سناریوهای مدیریت منابع آب صورت گرفته است. به همین منظور با به‌کارگیری مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی MODFLOW و لینک آن به مدل WEAP، مصارف و همچنین منابع آب حوضه

مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی تهیه شده در نرم‌افزار ArcGIS 10، مدل جریان دشت ساخته و واسنجی شد. سپس اثر سناریوهای مختلف مدیریتی منابع آب بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، تحت سناریوی مرجع میانگین افت سالانه ۷/۴ میلیون مترمکعب در آبخوان خواهد بود که اگر این روند ادامه داشته باشد، برای تامین آب مورد نیاز در بخش‌های شرب و کشاورزی در سال‌های آینده با مشکل مواجه خواهند شد. با اعمال سناریوی افزایش راندمان آبیاری، تقاضای آب مورد نیاز در بخش کشاورزی کاهش یافته است. در صورت احداث تصفیه‌خانه به‌عنوان یک منبع آب نامتعارف پایدار، بخشی از نیاز زراعی از طریق این منبع تامین خواهد شد و وضعیت



شکل ۱۲. درصد تامین نیاز مصارف مختلف، در اثر اعمال سناریو ترکیبی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۱۰. نتایج سناریوی ترکیبی (واحد حجم بر حسب میلیون متر مکعب)

شاخص اعتمادپذیری (%)		حجم کل آب تامین نشده	
کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب
۵۹/۸	۱۰۰	۳۶۳۵	۰
میانگین افت سالانه آبخوان		حجم آب برگشتی به آبخوان	
آبخوان گرگانرود	آبخوان	کشاورزی	شرب
۱/۸	۱/۸	۱۹۵۶	۲۳۷

اعمال سناریوی ترکیبی افزایش راندمان آبیاری و احداث تصفیه خانه، درصد تامین آب کشاورزی به طور میانگین افزایش یافته است و میانگین افت سالانه به ۱/۸ میلیون مترمکعب کاهش پیدا کرده است.

آبخوان در نتیجه اعمال این سناریو در مقایسه با سناریوی مرجع بهبود یافته است. تحت سناریوی تغییر اقلیم با کاهش ۲۰ درصدی دبی رودخانه میزان درصد تامین آب مورد نیاز کشاورزی نسبت به سناریوی مرجع کمتر شده است. در اثر

### منابع مورد استفاده

- Ahmadi, A., N. Zadeh Vakili, H. Safavi and A. Oeh Yazdi. 2013. Developing a dynamic planning model for allocating surface and groundwater resources, Case study (Zayandehrood Basin). *Journal of Iranian Water Resources Research* 11 (1):21-31.
- Alizadeh, H. 2005. Evaluation of the hydrological effect of water allocation scenarios in the basin using software WEAP. Thesis Master of Science in Sharif University of Technologies. Tehran, IRAN.
- Al-Omari, A., S. Al-Quraan, A. Al-salihi and F. Abdulla. 2009. A water management support system for Amman Zarqa Basin in Jordan. *Journal of Water Resources Management* 23(15): 3165-3189.
- Anderson, M. P. and W. W. Woessner. 1992. Applied Groundwater Modeling. Academic Press San Diego, California CA.
- De Condappa, D., A. Chaponnière and J. Lemoalle. 2009. A decision-support tool for water allocation in the Volta Basin. *Journal of Water International* 34(1): 71-87. (In Farsi).
- Gazerani, H. 2010. Application of subsystem of WEAP analysis in dissection support systems (case Study: Kashflood watershed). M.Sc. Thesis, Civil Engineering Faculty. Ferdowsi University of Mashhad, I.R.Iran

7. Haji pour, M. 2014. Integrated surface and groundwater resources management of Bojnourd basin with WEAP and MODFLOW models. Thesis Master's Degree, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R.Iran.
8. Höllermann, B., S. Giertz and B. Dieckrüger. 2010. Benin 2025-Balancing future water availability and demand using the WEAP 'Water Evaluation and Planning' System. *Journal of Water Resources Management* 24(13): 3591-3613.
9. Jafari, Z. 2013. Simulation of ground water table fluctuation in an urban region and Evaluation of the factors effecting. M.Sc. thesis. Agriculture College, Ferdowsi University of Mashhad, I.R.Iran
10. Khademi, S. 2015. Investigation of water resource management scenarios using of WEAP-MODFLOW software Case study: Haraz basin of Mazandaran Province Thesis Master's degree, Gorgan university of Agricultural Sciences and Natural Resources. Gorgan, I.R.Iran.
11. Larsen, H., O. Mark, M. K. Jha, A. Das Gupta. 2000. The application of models in integrated river basin management. Aisan Institute of Technology and DHI Water and Environment. Po Box 4, Klong Luang Pathumthani 12120.
12. Loucks, D. P., E. Beek, J. R. Stedinger, J. P. M. Dijkman and M. T. Villars. 2005. Water Resources System Planning and Management at Introduction to Method, Models and Application, Published by United Nation Educational Scientific and Cultural Organization.
13. Raskin, P., E. Hansen, Z. Zhu and D. Stavisky. 1992. Simulation of water supply and demand in the Aral Sea Region. *Journal of Water International* 17(2): 55-67.
14. Sanchez, G., E. Hansen and T. Esqueda. 2011. Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo-Tamesi river basin, Tamaulipas, Mexico. *Journal of Atmosphere* 24(1): 141-155.
15. Soltani, M. 2005. Water allocation management using scenario analysis and evolution planning. Thesis Master's degree, Tehran University .Tehran, I.R.Iran.

## Evaluation of Different Scenarios of Water Resources Management in the Gorganroud basin using WEAP and MODFLOW Models

F. Mohammadmirzaei, M. Zakerinia\* and A. Hezarjaribi<sup>1</sup>

(Received: June 9-2019; Accepted: October 5-2019)

### Abstract

Increase in population, agricultural development, and the reduction of surface water resources have resulted in an untapped harvest of ground water. On the other hand, the lack of attention to the balance between the exploitation and recharge of aquifers has led to a drop in water level in the aquifer. To understand the behavior of the ground water system and the status of resources and uses in the basin, as well as the situation of water exchange in these two parts, it is possible to connect reliable groundwater and surface water models. The purpose of this study was to simulate Gorganroud aquifer flow by using the groundwater model to understand the behavior of the aquifer system in different hydrological conditions and to provide a management solution to improve the supply and demand conditions. First, the status of the aquifer under study was simulated by using the information available in the area by Modflow; then the groundwater model results were transferred to the Water Evaluation and Planning model (WEAP) by the LINK KITCHEN Software. Then different management scenarios including increased irrigation efficiency in agriculture, the use of refinery effluents and the reduction of river flow due to climate changes were considered as two combinations of the above scenarios to alleviate water demand under this scenario; so, projections for a period of 20 years water resources of the basin were studied. The results of modflow calibration showed that there was a good agreement between observation and simulated water table, such that the RMSE for Steady and Transient condition was 0/972 and 0/97, respectively. The results also showed that simultaneously applying multiple water management strategies seems to be better than any of its individual states, thereby reducing water withdrawal on various resources.

**Keywords:** Gorganroud, Conjunctive use, WEAP, MODFLOW

1. Department of Water Resource, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: a\_zakerinia@yahoo.com