

ارزیابی اثربخشی سناریوهای تلفیقی مدیریت تقاضا در مهار افت آبخوان‌ها: مطالعه موردی حوضه قروه- دهگلان

عادل سلطانی^{۱*}، میلاد سلطانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش منابع آب سطحی ناشی از رشد جمعیت، توسعه کشاورزی و تغییرات اقلیمی فشار شدیدی بر آبخوان‌ها وارد کرده است. ایران، به‌ویژه در بخش کشاورزی، با افت جدی آب‌های زیرزمینی روبه‌روست. حوضه قروه-دهگلان در استان کردستان نمونه‌ای شاخص از این بحران است؛ به‌طوری‌که کمبود سالانه ۲۵ تا ۲۶ میلیون مترمکعب آب کشاورزی و خشکی تابستانه موجب کاهش تجمعی ۹۰.۲ میلیون مترمکعبی حجم سه آبخوان اصلی طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱ شده است. پیش‌بینی‌های اقلیمی تحت سناریوهای SSP نیز کاهش ۶ تا ۱۷ درصدی رواناب ورودی سدها و افزایش کمبود آب تا ۵۷ میلیون مترمکعب در سال تا افق ۲۰۴۵ را نشان می‌دهد. این پژوهش با استفاده از مدل WEAP و مدل IHACRES، اثر سناریوهای مختلف مدیریت تقاضا را بررسی کرد. نتایج نشان داد که اگرچه هر یک از سناریوهای مدیریتی به‌تنهایی اثرات مثبتی دارند، اما سناریوی تلفیقی بیشترین اثربخشی را داشته و با کاهش شیب افت سالانه آبخوان‌ها و بهبود متوسط ۸۸۷ درصدی، امکان بازگشت برخی آبخوان‌ها به شرایط اولیه و کاهش فشار بر منابع سطحی را فراهم می‌کند. این رویکرد الگویی کاربردی برای مدیریت پایدار آب در حوضه‌های خشک ایران است.

کلمات کلیدی: مدیریت یکپارچه منابع آب، تغییر اقلیم، آبخوان، مدل WEAP، کمبود آب.

۱. عضو هیأت علمی گروه مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: Soltani@pnu.ac.ir

۲. دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۱- مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بیش از ۴۰ درصد خشکی‌های کره زمین را تشکیل می‌دهند، کاهش منابع آب سطحی ناشی از رشد جمعیت و گسترش کشاورزی، فشار بی‌سابقه‌ای بر ذخایر آب زیرزمینی وارد کرده است (میلان و همکاران، ۲۰۲۳). ایران به‌عنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک جهان، سهم بالایی از منابع آب تجدیدپذیر خود را در بخش کشاورزی مصرف می‌کند و طی دهه‌های اخیر به دلیل کاهش بارندگی، خشک‌سالی‌های متوالی و برداشت بی‌رویه، با افت چشمگیر سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است (کیهمایون و همکاران، ۲۰۲۱؛ چاکرائی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ حداد و همکاران، ۲۰۲۵).

تغییرات اقلیمی آینده، نابرابری بین عرضه و تقاضای آب را تشدید خواهد کرد. این پدیده با دگرگونی در میزان بارندگی، تبخیر-تعرق و توزیع مکانی آن‌ها، تأثیر فزاینده‌ای بر سیستم‌های تأمین آب می‌گذارد (حسیسونه^۲ و همکاران، ۲۰۲۰؛ گالول^۳ و همکاران، ۲۰۲۰).

طی دهه‌های اخیر، خشک‌سالی‌های متوالی، پایدار و ویرانگر در بسیاری از مناطق جهان رخ داده است (مصطفی و رحمان، ۲۰۱۸؛ یون^۴ و همکاران، ۲۰۲۱). در چنین شرایطی، گذار از رویکردهای سنتی مبتنی بر توسعه عرضه (سازه‌ای) به سمت مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) اجتناب‌ناپذیر است. این رویکرد با تأکید بر مدیریت تقاضا، کنترل برداشت، افزایش بهره‌وری و هماهنگی بین ذی‌نفعان، امکان حفظ پایدار منابع زیرزمینی را در مناطق تحت تنش آبی فراهم می‌کند (جیکمن^۵ و همکاران، ۲۰۱۶). تجربه‌های موفق جهانی و منطقه‌ای نشان داده است که ترکیب اقدامات قانونی، فنی و نظارتی مانند نصب کتورهای هوشمند، انسداد چاه‌های غیرمجاز، اصلاح پروانه‌های بهره‌برداری و ساماندهی چاه‌های فاقد پروانه، می‌تواند برداشت بی‌رویه را

به‌طور چشمگیری کاهش دهد و روند تخلیه آبخوان‌ها را معکوس یا حداقل کند سازد (زارعی و همکاران، ۲۰۲۲؛ هوستختر^۶ و وستر^۷، ۲۰۱۷).

باوجود مطالعات گسترده در زمینه مدیریت منابع آب زیرزمینی، دو شکاف تحقیقاتی اصلی در منطقه قروه-دهگلان وجود دارد: اول، ارزیابی کمی و یکپارچه از اثربخشی سناریوهای تلفیقی مدیریت تقاضا بر حجم ذخیره آبخوان‌ها به‌صورت هم‌زمان انجام نشده است. دوم، تأثیر متقابل تغییرات اقلیمی آینده و سناریوهای مدیریت تقاضا بر روند افت آبخوان‌ها در این حوضه بحرانی تاکنون موردبررسی قرار نگرفته است. مطالعات پیشین در این منطقه عمدتاً به بررسی منفرد هر یک از سناریوهای مدیریتی پرداخته‌اند و اثربخشی تلفیق آن‌ها را به‌صورت کمی ارزیابی نکرده‌اند. پژوهش حاضر با ارائه سناریوی تلفیقی شامل چهار اقدام مدیریتی (کتور هوشمند، انسداد چاه‌های غیرمجاز، اصلاح پروانه‌ها و تعیین تکلیف چاه‌های فاقد پروانه) و ارزیابی هم‌زمان اثر آن بر حجم آبخوان‌ها تحت شرایط اقلیمی آینده، این شکاف را پر می‌کند. محور اصلی این پژوهش، مدیریت تقاضا و ارزیابی سناریوهای کاهش برداشت از آبخوان‌ها است. مدل‌سازی تغییرات اقلیمی صرفاً برای تعیین شرایط عرضه آب در آینده و ارائه ورودی واقع‌بینانه به سناریوهای مدیریتی انجام شده است.

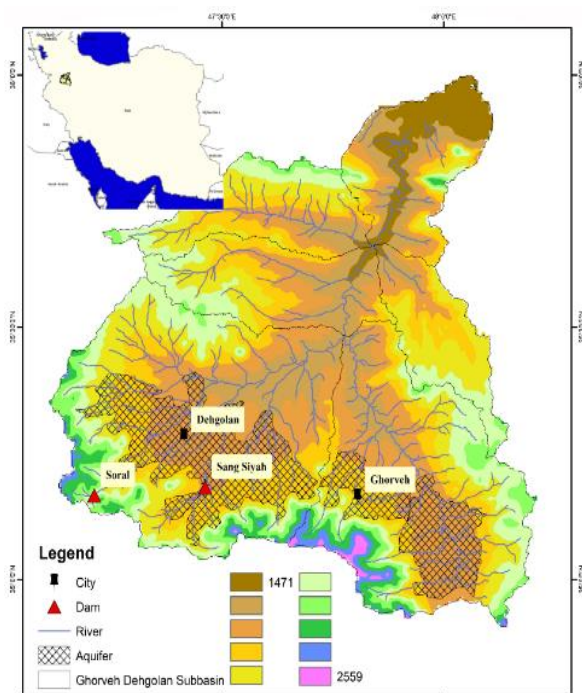
ازاین‌رو، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کمی اثربخشی سناریوهای تلفیقی مدیریت تقاضا در مهار افت آبخوان‌های حوضه قروه دهگلان تحت شرایط اقلیمی کنونی و آینده است. نوآوری این پژوهش در تلفیق مدل WEAP، مدل IHACRES، سناریوهای اقلیمی SSP و پنج سناریوی مدیریت تقاضا (شامل سناریوی تلفیقی) در یک چارچوب یکپارچه می‌باشد.

در این راستا، ابتدا وضعیت کنونی عرضه و تقاضای آب در حوضه قروه دهگلان با استفاده از مدل WEAP شبیه‌سازی و بیان دقیق منابع سطحی و زیرزمینی استخراج

1. Chakraei
2. Hssaisoune
3. Gaaloul
4. Yoon
5. Jakeman

6. Hoogesteger
7. Wester

قروه، دهگلان و چاردولی می‌باشند. از نظر هیدرولوژیکی، رودخانه‌های شور و تلوار مهم‌ترین منابع آب سطحی حوضه هستند (کیهمایون و همکاران، ۲۰۲۳). بیشترین دبی این رودخانه‌ها در فروردین و کمترین آن در مرداد و شهریور ثبت شده که نشان‌دهنده وابستگی جریان به ذوب برف و بارش‌های زمستانه است. میانگین بارندگی سالانه حوضه ۲۷۰.۳ میلی‌متر (با دامنه ۱۳۸ تا ۵۳۰ میلی‌متر) بوده است. کاهش بارندگی در سال‌های اخیر همراه با گسترش کشاورزی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، فشار شدید بر منابع آب و افت مستمر سطح آبخوان‌ها را به همراه داشته است (بایزیدی و کاکي، ۲۰۲۱).



شکل (۱): مختصات محدوده مورد مطالعه

Figure 1: Coordinates of the Study Area

بر اساس آمار، اطلاعات و نتایج بیان‌های ارائه‌شده، حجم ذخایر آب در محدوده مطالعاتی قروه-دهگلان محاسبه و در جدول (۱) ارائه شده است (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۷). حجم کل آبخوان آبرفتی دشت دهگلان ۵۹۲.۶۵ میلیون مترمکعب است که از این مقدار ۲۵۴.۲۸ میلیون مترمکعب ذخیره تجدیدشونده و ۳۳۸.۳۷ میلیون مترمکعب ذخیره ثابت می‌باشد. این مقادیر برای آبخوان دشت قروه به ترتیب برابر

گردید. سپس، برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی، از سناریوهای SSP و خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) استفاده شد و مدل بارش رواناب IHACRES برای برآورد رواناب ورودی به سدهای سورال، سنگ سیاه و قوچم به کار رفت. در ادامه، پنج سناریوی مدیریت تقاضا شامل نصب کنتورهای هوشمند، انسداد چاه‌های غیرمجاز، اصلاح و تعدیل پروانه‌های بهره‌برداری، تعیین تکلیف چاه‌های فاقد پروانه و سناریوی تلفیقی، برای بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۰۷ شبیه‌سازی شدند. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که کدام‌یک از سناریوها بیشترین تأثیر را بر کاهش افت حجم آبخوان‌ها و بازگشت به شرایط پایدار دارد و اولویت‌بندی عملی برای سیاست‌گذاران منطقه ارائه می‌کند.

تغییر اقلیم از طریق کاهش بارندگی و افزایش تبخیر-تعرق، تغذیه آبخوان را کاهش می‌دهد. این کاهش تغذیه، همراه با خشک‌سالی‌های متوالی، فشار برداشت از آبخوان را افزایش می‌دهد. در چنین شرایطی، مدیریت تقاضا به جای توسعه عرضه به عنوان راهکار اصلی مطرح می‌شود. برای ارزیابی کمی این راهکارها، مدل WEAP برای شبیه‌سازی تخصیص منابع و مدل IHACRES برای برآورد رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم به کار گرفته شده‌اند. از این رو، این پژوهش این مؤلفه‌ها را در یک چارچوب یکپارچه به هم متصل می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی قروه-دهگلان در غرب ایران و استان کردستان واقع شده و بخش‌هایی از آن در مرز استان‌های زنجان و همدان قرار دارد. این حوضه بین طول‌های شرقی ۴۷ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۵ تا ۳۶ درجه واقع شده و دشت‌های قروه، دهگلان و چاردولی را در برمی‌گیرد (شکل ۱). مساحت کل حوضه حدود ۷۲۴۶ کیلومتر مربع و میانگین ارتفاع آن حدود ۱۳۲۰ متر از سطح دریا است. منابع تأمین آب منطقه شامل سدهای سورال، قوچم و سنگ سیاه (منابع سطحی) و آبخوان‌های

۹۲.۹۸، ۳۷.۳۲ و ۵۵.۶۶ میلیون مترمکعب و برای آبخوان دشت چهاردولی برابر ۱۴۴.۴۵، ۸۵.۹ و ۲ و ۵۸.۵۳ میلیون مترمکعب است.

جدول (۱): مشخصات آبخوان‌های محدوده مطالعاتی قروه دهگلان (میلیون مترمکعب)

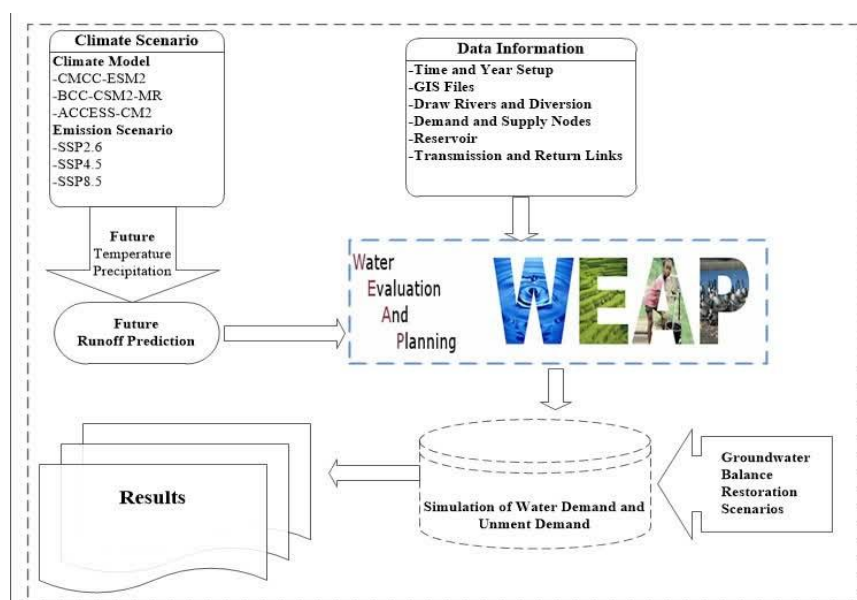
Table 1: Characteristics of the Aquifers in the Qorveh-Dehgolan Study Area (MCM)

نام آبخوان آبرفتی	حجم ذخیره کل	تجدیدشونده	ثابت
دهگلان	۵۹۲.۶۵	۲۵۴.۲۸	۳۳۸.۳۷
قروه	۹۲.۹۸	۳۷.۳۲	۵۵.۶۶
چهاردولی	۱۴۴.۴۵	۸۵.۹۲	۵۸.۵۳

۲-۲- روش تحقیق

در این پژوهش، محدوده مطالعاتی قروه-دهگلان توسط مدل WEAP طی سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۲۱ شبیه‌سازی گردید. به‌منظور بررسی تغییرات اقلیمی و رواناب، از خروجی سه مدل GCM (ACCESS-CM2، BCC-CSM2-MR و CMCC-ESM2) تحت سه سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 گزارش ششم IPCC استفاده شد. داده‌های بارش و دمای حداکثر و حداقل با استفاده از نرم‌افزار LARS-WG و تکنیک ریزمقیاس‌سازی برای دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۴۵) تهیه گردید. برای بررسی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم بر رواناب سرشاخه‌های تلوار، سنگ سیاه و چم‌میرکی، از مدل بارش-رواناب IHACRES

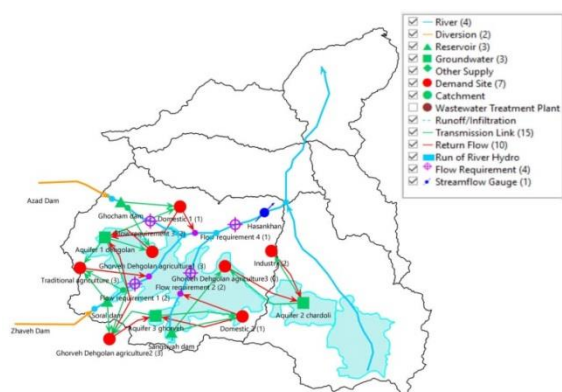
استفاده شد و خروجی آن به‌عنوان ورودی مدل WEAP در نظر گرفته شد. همچنین، سناریوهای تعادل‌بخشی شامل نصب کتورهای هوشمند، انسداد چاه‌های غیرمجاز، اصلاح پروانه‌های بهره‌برداری، تعیین تکلیف چاه‌های فاقد پروانه و سناریوی تلفیقی تعریف و شبیه‌سازی شدند. درنهایت، با ترکیب نتایج مدل‌های اقلیمی، شبیه‌سازی بارش-رواناب و سناریوهای تعادل‌بخشی، اثرات تغییر اقلیم و سیاست‌های مدیریت منابع آب بر وضعیت آبخوان‌ها و مصارف منطقه ارزیابی گردید (شکل ۲).



شکل (۲): چارچوب پژوهش، شامل ادغام ابزارهای مختلف مدل‌سازی و مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه

Figure 2: Research framework, including the integration of various modeling tools and datasets used in this study

۲-۳- WEAP مدل



شکل (۳): شماتیک محدوده مطالعاتی قروه دهگلان در مدل

WEAP
Figure 3: Schematic of the Qorveh-Dehghan Study Area in the WEAP Model

بر اساس مطالعات کشاورزی، اراضی کشاورزی محدوده قروه دهگلان شامل اراضی حلقه بر سستی و اراضی کشاورزی دشت‌های دهگلان، قروه و چهاردولی می‌باشد. آبخوان‌های آبرفتی دهگلان، قروه و چهاردولی منبع اصلی تأمین نیاز کشاورزی در محدوده مطالعاتی می‌باشند. همچنین رودخانه‌های تلوار، چم میرکی و سنگ سیاه از جمله رودخانه‌هایی هستند که بخشی از اراضی کشاورزی را تأمین می‌کنند. مساحت اراضی کشاورزی، میزان نیاز آبی و راندمان کشاورزی در جدول (2) ارائه شده است (مهندسین مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۳).

در سال‌های اخیر، مدل‌ها و ابزارهای مختلفی از جمله WEAP، MIKE BASIN، MODSIM و VENSIM برای شبیه‌سازی مسائل تخصیص و مدیریت منابع آب توسعه یافته‌اند. در این میان، مدل WEAP که توسط مؤسسه محیط‌زیست استکهلم (SEI) ارائه شده، به عنوان یک ابزار پیش‌بینی، قابلیت شبیه‌سازی نیاز آبی، جریان‌ها، ذخایر، کیفیت آب، آلودگی و تخصیص منابع را داراست (ییتس^۱ و همکاران، ۲۰۰۵؛ گائو^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). این مدل امکان تحلیل هم‌زمان مؤلفه‌های طبیعی و انسان‌ساخت سیستم آب از جمله رواناب، دبی پایه، تغذیه آبخوان‌ها، مخازن، حلقه‌ها، بهره‌برداری از سدها، تولید برق آبی و نیازهای زیست‌محیطی را فراهم می‌کند (مهتا و همکاران، ۲۰۱۱؛ حداد و همکاران، ۲۰۲۱). مزیت اصلی WEAP، رویکرد یکپارچه و سیاست‌محور آن است که در آن منابع و مصارف آب به صورت هم‌زمان و با در نظر گرفتن اولویت‌ها و قیود مدیریت می‌شوند. این مدل با استفاده از برنامه‌ریزی خطی، حداکثر تأمین نیاز مراکز تقاضا را در هر گام زمانی دنبال می‌کند (دمرتزی^۳ و همکاران، ۲۰۱۴). WEAP در دهه‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبریز داشته و در مطالعات متعددی از جمله حوضه دریای آرال راسکین^۴ و همکاران، (۱۹۹۲)، مناطق ساحلی چین لی^۵ و همکاران، (۲۰۱۵) و ارزیابی منابع آب سوریه تا افق ۲۰۵۰ به کار رفته است (بنی حبیب و همکاران، ۲۰۱۹؛ مراد^۶ و الشیهابی^۷، ۲۰۱۶). در این پژوهش، شماتیک منابع و مصارف آب محدوده قروه-دهگلان طی دوره ۲۰۰۷-۲۰۲۱ در محیط WEAP ترسیم و شبیه‌سازی شده است (شکل ۳).

1. Yates
2. Gao
3. Demertzi
4. Raskin
5. Li
6. Mourad
7. Alshihabi

جدول (۲): مقادیر منابع و مصارف محدوده مطالعاتی قروه دهگلان

Table 2: Values of Water Resources and Demands in the Qorveh-Dehgolan Study Area

سایت تقاضا	مساحت (ha)	آب مورد نیاز (m ³ /ha)	نیاز سالانه (MCM)	راندمان آبیاری (%)	درصد تأمین		آب برگشتی (%)	درصد آب برگشتی	
					سطحی	زیرزمینی		سطحی	زیرزمینی
خانگی	—	—	15.5	—	100	0	76	40	60
صنعت	—	—	4.7	—	100	0	55	100	0
کشاورزی سنتی	700	9510	6.65	54	80	20	25	0	100
کشاورزی	46300	9510	440.3	—	93	7	27	83	17
محیط زیست	—	—	2.5	—	—	100	—	—	—

شرب و صنعت به‌طور کامل متکی بر آب زیرزمینی است. میزان آب برگشتی به آبخوان در بخش کشاورزی حدود ۸۰ درصد، در صنعت ۱۰۰ درصد و در شرب ۴۰ درصد در نظر گرفته شده است. در این پژوهش برای ارزیابی دقت واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی، از شاخص‌های نش-ساتکلیف (NS)، اریب (Bias) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شده است.

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sigma_S - \sigma_O} \right]^2 \quad (1)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$BIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \quad (3)$$

NS هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است و دامنه آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ می‌باشد. شاخص Bias نیز هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است؛ مقادیر مثبت بیانگر کم‌برآوردی و مقادیر منفی نشان‌دهنده بیش‌برآوردی متغیر موردبررسی هستند و آستانه مشخصی برای آن تعریف نشده است.

جدول (۲) مقادیر منابع موجود، مصارف و نیازهای آبی سالانه محدوده مطالعاتی را به تفکیک بخش‌های مختلف نشان می‌دهد. نیاز آبی سالانه بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت به‌ترتیب ۴۴۷، ۷.۴ و ۱۵.۵ میلیون مترمکعب برآورد شده است. سطح زیرکشت کشاورزی حدود ۴۷ هزار هکتار بوده و نزدیک به ۹۰ درصد نیاز آبی آن از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. همچنین، تأمین آب بخش‌های

در روابط فوق، O_i داده‌های مشاهداتی، P_i داده‌های برآورد شده، $\bar{O}$ و $\bar{S}$ میانگین داده‌های مشاهداتی و برآورد شده، σ واریانس و n تعداد سال‌های آماری می‌باشد. R^2 بیانگر ارتباط داده‌های مشاهداتی و برآورد شده است. دامنه این پارامتر بین ۰ تا ۱ است، هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه می‌باشد. شاخص

۲-۴- تغییر اقلیم

چارچوب «طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی» مجموعه‌ای از برنامه‌های کنترلی، حفاظتی و اصلاحی را تدوین و اجرا کرده است. در استان کردستان نیز دشت‌های قروه و دهگلان به‌عنوان دشت‌های ممنوعه و دارای تنش شدید آبی شناخته شده و به‌عنوان محدوده پایلوت برای اجرای اقدامات تعادل بخشی تعیین شده‌اند. بر همین اساس، باهدف کنترل برداشت‌های بی‌رویه، کاهش افت سطح ایستابی و بازگرداندن آبخوان‌ها به شرایط پایدار، سناریوهای زیر در مدل تخصیص و مدیریت منابع آب منطقه تعریف و شبیه‌سازی شدند:

۱. نصب و بهره‌برداری از کنتورهای هوشمند (سناریو ۱) این سناریو باهدف کنترل برداشت‌های واقعی، ثبت لحظه‌ای حجم پمپاژ، اعمال محدودیت برداشت در دوره‌های بحرانی و افزایش امکان نظارت دقیق بر بهره‌برداری از چاه‌ها اجرا شده است.

۲. انسداد چاه‌های غیرمجاز (۱۶۵۰ حلقه) (سناریو ۲) با توجه به این‌که بخش قابل توجهی از افت آبخوان ناشی از بهره‌برداری خارج از کنترل است، مسدودسازی چاه‌های فاقد مجوز در قالب طرح تعادل بخشی، به‌عنوان یک سناریوی مستقیم کاهش برداشت لحاظ شد.

۳. اصلاح و تعدیل پروانه‌های بهره‌برداری (سناریو ۳) در این سناریو با بازنگری در حجم مجاز برداشت، متناسب‌سازی پروانه‌ها با وضعیت واقعی تغذیه آبخوان و کاهش اثرات اضافه برداشت در بخش کشاورزی، تنظیم بهره‌برداری صورت گرفت.

۴. تعیین تکلیف چاه‌های فاقد پروانه (سناریو ۴) این سناریو باهدف ثبت، ساماندهی و کنترل چاه‌هایی که از گذشته فاقد مجوز بوده‌اند اجرا شد تا از حالت بهره‌برداری نامحدود خارج و در قالب پروانه‌های محدودشده و قابل پایش قرار گیرند.

۵. سناریوی تلفیقی (نصب کنتور، انسداد چاه‌های غیرمجاز، اصلاح پروانه‌ها و تعیین تکلیف چاه‌ها) (سناریو ۵)

درک صحیح از تغییرات اقلیمی برای پیش‌بینی وضعیت آینده و برنامه‌ریزی منابع آب ضروری است. مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) مهم‌ترین ابزار پیش‌بینی تغییرات اقلیم در مقیاس جهانی هستند (ساجیندرا^۱ و همکاران، ۲۰۱۸)، اما به دلیل قدرت تفکیک مکانی پایین (۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر) برای مطالعات منطقه‌ای محدودیت دارند (تیلور^۲ و همکاران، ۲۰۱۲). استفاده از تکنیک‌های مقیاس‌کاهی، روشی مؤثر برای بهبود وضوح خروجی این مدل‌ها است (همپل^۳ و همکاران، ۲۰۱۳؛ مهربان و همکاران، ۲۰۲۴).

در این پژوهش، از سناریوهای مسیرهای غلظت نماینده و سناریوهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) گزارش ششم IPCC برای بررسی تغییرات آینده بارش و تأثیر آن بر منابع آب سطحی استفاده شد. سناریوهای CMIP6 تغییرات اقلیمی را در ارتباط با تحولات اجتماعی-اقتصادی شبیه‌سازی می‌کنند (جان تورک^۴ و کولاج^۵، ۲۰۲۱). بدین منظور، خروجی سه مدل AOGCM تحت سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 به‌کار گرفته شد. با توجه به نقش مهم مدل‌های اقلیمی و عدم قطعیت بالای آن‌ها، انتخاب مدل‌های دارای مهارت مناسب در پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی اهمیت زیادی دارد. پس‌ازانتخاب GCMها، داده‌های بارش و دمای حداقل و حداکثر با استفاده از مدل LARS-WG برای دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۴۵ مقیاس‌کاهی شدند. در ادامه، به‌منظور بررسی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم بر رواناب سرشاخه‌های تلوار، سنگ سیاه و چم‌میرکی، از مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده گردید.

۲-۵- مدیریت و تعادل بخشی آبخوان‌ها

در سال‌های اخیر، به‌دلیل افت مستمر سطح آب زیرزمینی و تشدید کسری مخازن در آبخوان‌های کشور، وزارت نیرو در

1. Sachindra
2. Taylor
3. Hempel
4. Canturk
5. Kulaç

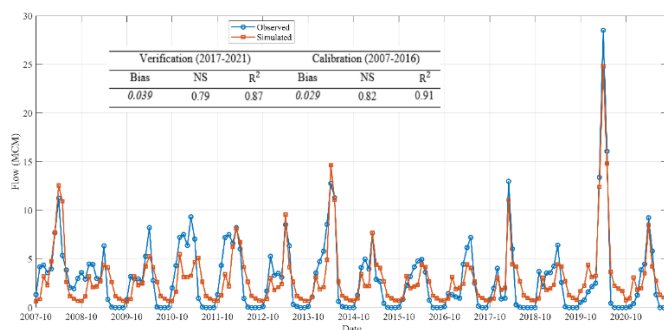
هیدرومتری حسن خان به کمک شاخص‌های (NS) و (Bias) مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. واسنجی مدل برای دوره (۲۰۰۷-۲۰۱۶) صورت گرفت و ۵ سال انتهای دوره (۲۰۱۷-۲۰۲۱) نیز برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل WEAP در دوره واسنجی ($NSE = 0.82$, $Bias = 0.029$) و صحت سنجی ($NSE = 0.79$, $MARE = 0.04$) برای ایستگاه هیدرومتری حسن خان نشان از عملکرد قابل قبول مدل در ایستگاه موردنظر دارد (شکل ۴). نتایج همچنین نشان می‌دهد که مدل کالیبره شده تخمین خوبی از مقادیر ماکزیمم‌ها دارد و جریان پایه را نیز تا حدودی به‌خوبی تخمین زده است. در نتیجه با توجه به نتایج به دست آمده کالیبره مدل WEAP مناسب ارزیابی گردید.

با توجه به وابستگی پارامترهای مدیریتی و اثر جمعی آن‌ها، یک سناریوی ترکیبی طراحی شد تا بیشترین اثر در بازگشت تعادل آبخوان حاصل شود. نتایج این سناریو نسبت به سناریوهای منفرد نشان‌دهنده کاهش برداشت، کنترل افت آبخوان و بهبود وضعیت کسری مخزن بوده است.

۳- نتایج

۳-۱- شبیه‌سازی مدل WEAP

به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی محدوده مورد مطالعه طی دوره آماری (۲۰۰۷-۲۰۲۱) تمامی منابع و مصارف اعم از دبی سرشاخه رودخانه تلوار و سایر رودخانه‌ها، نیازهای کشاورزی، شرب و صنعت، منابع آب زیرزمینی، لینک‌های برداشت و آب برگشتی به تفکیک وارد مدل WEAP گردید. برای کاهش خطای شبیه‌سازی، مدل ایجاد شده در ایستگاه



شکل (۴): میزان جریان مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده در ایستگاه حسن خان

Figure 4: Observed and Simulated Streamflow at the Hasan Khan Station

دهگلان، بخش کشاورزی تنها بخشی است که با کمبود آب مواجه است و این کمبود صرفاً در ماه‌های گرم سال رخ می‌دهد که اوج آن در مردادماه با ۶.۳ میلیون مترمکعب در ماه است.

تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی مدل WEAP در وضعیت موجود (۲۰۰۸-۲۰۲۱) نشان می‌دهد (جدول ۳) که تأمین مصارف شرب و صنعت به‌صورت کامل صورت می‌گیرد در صورتی که بخش‌های کشاورزی به‌طور متوسط ۲۰-۳۰ میلیون مترمکعب در سال با کمبود منابع مواجه است. همچنین نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد در منطقه قروه

جدول (۳): عدم تأمین نیازها در سال‌های مختلف دوره پایه (mcm)

Table 3: Unmet Demands in Different Years of the Base Period (MCM)

نیاز	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
کشاورزی	19.3	24.7	21.7	17.8	20.1	34.3	21.6	24.1	33.6	44.0	45.6	32.2	26.6	31.7
صنعت	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
خانگی	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

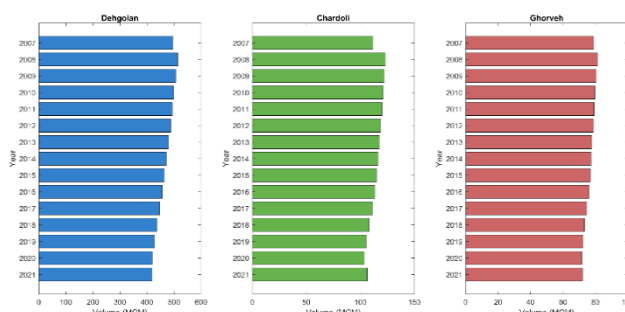
جدول (۴): متوسط عدم تأمین نیازها در ماه‌های مختلف دوره پایه (mcm)

Table 4: Average Unmet Demands in Different Months of the Base Period (MCM)

نیاز	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
کشاورزی	2.1	0	0	0	0	0	1.1	3.9	4.5	5.6	6.3	3.5
صنعت	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
خانگی	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

در بازه ۱۴ ساله ۲۰۰۷-۲۰۲۱، سه آبخوان دهگلان، چاردولی و قروه مجموعاً ۹۰۰۲ میلیون مترمکعب از ذخیره خود را از دست داده‌اند که معادل متوسط افت سالانه ۶۰۴۴ میلیون مترمکعب از کل سیستم است (شکل ۵). آبخوان دهگلان با بزرگ‌ترین ذخیره اولیه (۴۹۶۰۲ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۰۷) بیشترین افت مطلق را تجربه کرده و تا سال ۲۰۲۱ به ۴۱۸۰۲ میلیون مترمکعب رسیده است؛ یعنی کاهش ۷۸ میلیون مترمکعب (معادل ۱۵۰۷ درصد افت تجمعی). میانگین افت سالانه دهگلان حدود ۵۰۶ میلیون مترمکعب است، اما از سال ۲۰۱۷ به بعد سرعت افت تقریباً

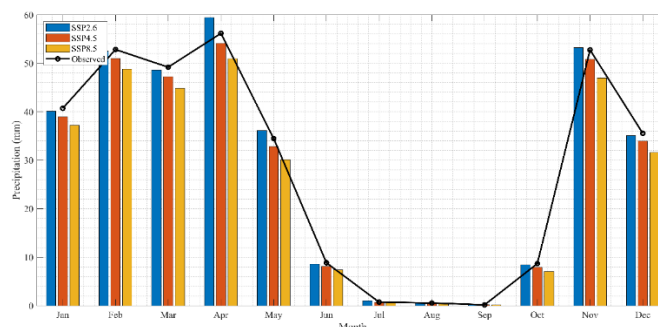
دو برابر شده (از ۲۰۶ به ۴۰۹-۱۰ میلیون مترمکعب در سال). آبخوان چاردولی از ۱۱۱۰۶ به ۱۰۶۰۲ میلیون مترمکعب رسیده و ۵۰۴ میلیون مترمکعب (۴۰۸ درصد) افت کرده است؛ افت سالانه متوسط آن فقط ۰۰۳۸ میلیون مترمکعب بوده و تا سال ۲۰۲۰ روند نسبتاً ملایمی داشته است. آبخوان قروه کوچک‌ترین ذخیره را داشته (از ۷۸۰۸ به ۷۲۰۰ میلیون مترمکعب) و کاهش ۶۰۸ میلیون مترمکعب (۸۰۶ درصد افت) را نشان می‌دهد و افت سالانه آن (۰۰۴۹ میلیون مترمکعب) نسبت به حجم اولیه‌اش قابل توجه است.



شکل (۵): کاهش حجم آبخوان‌های دهگلان، چاردولی و قروه طی سال‌های (۲۰۲۱-۲۰۰۷)

Figure 5: Decline in the Volumes of Dehgolan, Chardoli, and Qorveh Aquifers During 2007–2021

کشاورزی همخوانی دارد (۲۵-۲۶ میلیون مترمکعب سالانه طبق جدول ۴). سناریوی SSP2.6 با مجموع ۳۴۳۰۸ میلی‌متر نزدیک‌ترین به داده‌های مشاهده‌شده است و افزایش جزئی در بهار و پاییز پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که SSP4.5 (۳۲۶۰۲ میلی‌متر) و SSP8.5 (۳۰۶ میلی‌متر) کاهش کلی بارش را نشان می‌دهند و فشار بر آبخوان‌ها را تشدید خواهند کرد. این الگوها بر لزوم مدیریت پایدار آب زیرزمینی تأکید دارند، زیرا حتی در سناریوهای خوش‌بینانه، خشکی تابستانه پایدار می‌ماند و افت حجم آبخوان‌ها (۹۰۰۲ میلیون مترمکعب در ۱۴ سال) را تسریع می‌کند.



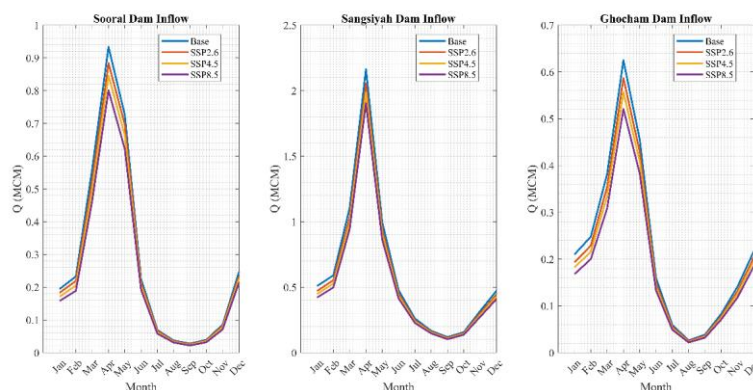
شکل (۶): مقادیر داده‌های بارش تحت سناریوهای SSP 1-2.6 و SSP 5-8.5

Figure 6: Precipitation Data under SSP 1-2.6 and SSP 5-8.5 Scenarios

اقليمی (SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5)، جريان ورودی در تمام ماه‌ها کمتر از دوره پایه است و با افزایش شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش بیشتری نشان می‌دهد. مجموع جريان سالانه برای سد سورال از ۳۰۳۸ میلیون مترمکعب در دوره پایه به ۳۰۲۰ (کاهش ۵۰۳ درصد در SSP2.6)، ۳۰۰۴ (۹۰۹ درصد در SSP4.5) و ۲۰۸۵ میلیون مترمکعب (۱۵۰۵ درصد در SSP8.5) می‌رسد. برای سنگ سیاه، از ۷۰۳۳ به ۶۰۹۲، ۶۰۶۵ و ۶۰۳۴ میلیون مترمکعب (کاهش ۵۰۷ تا ۱۳۰۶ درصد) و برای قوچم از ۲۰۶۵ به ۲۰۴۷، ۲۰۳۵ و ۲۰۱۹ میلیون مترمکعب (کاهش ۶۰۶ تا ۱۷۰۲ درصد) کاهش می‌یابد. این روندها می‌تواند پایداری منابع آب سطحی را تهدید کند و با افت حجم آبخوان‌ها (۹۰۰۲ میلیون مترمکعب در ۱۴ سال) و کمبود کشاورزی (۲۵-۲۶ میلیون مترمکعب سالانه) مرتبط باشد، بنابراین پیشنهاد می‌شود استراتژی‌های مدیریت یکپارچه آب برای کاهش اثرات اقلیمی اتخاذ شود.

در این تحقیق، از سه مدل اقلیمی (ACCESS-CM۲، MR۲BCC-CSM و ۲CMCC-ESM) برای تولید داده‌های بارش در آینده استفاده شد. شکل (۶) نشان‌دهنده توزیع ماهانه بارندگی در منطقه قروه-دهگلان است که رژیم مدیریتانه‌ای-قاره‌ای را تأیید می‌کند. بیش از ۸۵ درصد بارش سالانه (مجموع مشاهده‌شده: ۳۴۰۰۶ میلی‌متر) در ماه‌های نوامبر تا مه رخ می‌دهد، با اوج در آوریل (۵۶۰۲ میلی‌متر مشاهده‌شده) و نوامبر (۵۲۰۸ میلی‌متر). در مقابل، دوره تابستانی (ژوئن تا سپتامبر) با بارش نزدیک به صفر (کمتر از ۱۰ میلی‌متر کل) همراه است که مستقیماً با کمبودهای

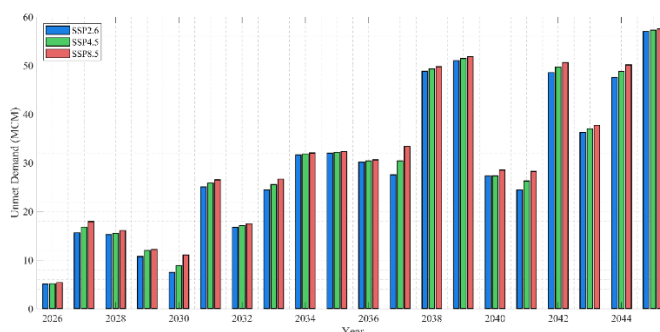
در شکل (۷)، توزیع ماهانه ورودی جريان به سه سد سورال، سنگ سیاه و قوچم در منطقه قروه-دهگلان طی دوره آتی (۲۰۲۶-۲۰۴۵) بررسی شده است. الگوی فصلی جريان در هر سه سد مشابه و تحت تأثیر رژیم بارندگی منطقه است. اوج جريان در ماه‌های بهاری (فروردین و اردیبهشت) مشاهده می‌شود که ناشی از ذوب برف و بارش‌های فصلی است. برای سد سورال، پیک جريان در پایه (دوره تاریخی) برابر با ۰۰۹۳ میلیون مترمکعب در فروردین است، درحالی‌که سد سنگ سیاه با ۲۰۱۶ میلیون مترمکعب بیشترین حجم ورودی را در همین ماه دارد و سد قوچم با ۰۰۶۳ میلیون مترمکعب کمترین است. جريان تابستانه (خرداد تا شهریور) در تمام سدها به مقادیر ناچیز (کمتر از ۰۰۱ میلیون مترمکعب در تیر و مرداد) کاهش می‌یابد که با دوره خشکی شدید بارندگی همخوانی دارد و وابستگی به منابع آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد. تحت سناریوهای تغییرات



شکل (۷): جریان سرشاخه‌ها ورودی به سدها تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی

Figure 7: Headwater Inflows to Reservoirs under Climate Scenarios

شکل (۸) توزیع سالانه کمبودهای آبی در منطقه قروه- دهگلان را تحت سه سناریوی تغییرات اقلیمی SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 نشان می‌دهد. الگوی کلی حاکی از روند افزایشی کمبودها در طول دوره است که در سال‌های اولیه (حدود ۵-۶ میلیون مترمکعب در ۲۰۲۶) به اوج در دهه ۲۰۴۰ (تا ۵۷ میلیون مترمکعب در ۲۰۴۵) می‌رسد، با نوسانات سالانه ناشی از تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده. مجموع کمبود تجمعی در ۲۰ سال برای SSP2.6 برابر با ۵۸۲٫۳ میلیون مترمکعب، برای SSP4.5 برابر با ۵۹۸٫۳ میلیون مترمکعب و برای SSP8.5 برابر با ۶۱۵٫۶ میلیون مترمکعب است که نشان‌دهنده افزایش ۲۰٫۸ درصدی در SSP4.5 و ۵۰٫۷ درصدی در SSP8.5 نسبت به SSP2.6 است. میانگین سالانه کمبود نیز از ۲۹٫۴ میلیون مترمکعب در SSP2.6 به ۳۰٫۳ در SSP4.5 و ۳۱٫۸ در SSP8.5 افزایش



شکل (۸): میزان عدم تأمین نیازهای محدوده مطالعاتی در دوره آتی

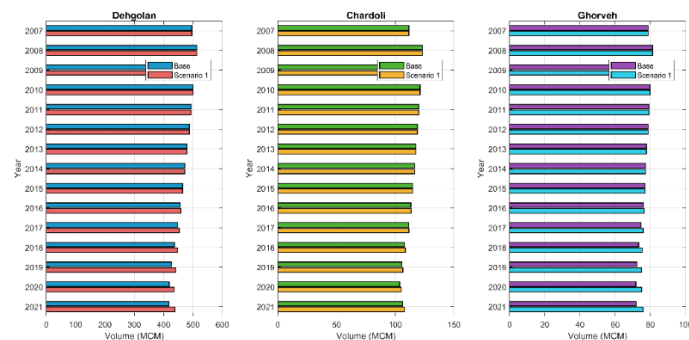
Figure 8: Water Demand Shortfalls in the Study Area during the Future Period

۳-۳- نتایج تعادل بخشی آبخوان‌ها

شکل ۹ تغییرات حجم آبخوان‌های دهگلان، چاردولی و قروه را در دوره پایه (Base) و سناریو ۱ (نصب و بهره‌برداری از کتورهای هوشمند) از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱ مقایسه می‌کند. برای اجرای این سناریو یک دوره آماری

(۲۰۲۱-۲۰۱۶) در نظر گرفته شد. تا سال ۲۰۱۵، حجم‌ها در هر دو حالت یکسان هستند، اما از ۲۰۱۶ به بعد، سناریو ۱ حجم بالاتری را حفظ کرده و روند افت را کند می‌کند که نشان‌دهنده اثربخشی کنترل برداشت آب از طریق کنتورهای هوشمند است. در آبخوان دهگلان (بزرگ‌ترین ذخیره با ۴۹۶.۲ میلیون مترمکعب اولیه)، حجم در سال ۲۰۲۱ از ۴۱۸.۲ میلیون مترمکعب در پایه به ۴۳۹.۲ میلیون مترمکعب افزایش یافته (افزایش حدود ۱۸ میلیون مترمکعب)، درحالی‌که چاردولی از ۱۰۶.۲ به ۱۰۷.۹ میلیون مترمکعب (افزایش ۱.۷

میلیون مترمکعب) و قروه از ۷۲.۰ به ۷۵.۹ میلیون مترمکعب (افزایش ۳.۹ میلیون مترمکعب) رسیده است. این بهبودها عمدتاً در سال‌های پایانی (۲۰۱۹-۲۰۲۱) برجسته‌تر است، جایی که تفاوت سالانه در دهگلان به بیش از ۱۵-۱۸ میلیون مترمکعب می‌رسد. این سناریو افت سالانه را در دهگلان از میانگین ۵.۶ میلیون مترمکعب در پایه به سطوح پایین‌تری کاهش می‌دهد. نتایج بر لزوم گسترش چنین مداخلات مدیریتی به‌ویژه در مناطقی با رژیم بارندگی خشک تابستانه برای پایداری منابع آب زیرزمینی تأکید دارد.

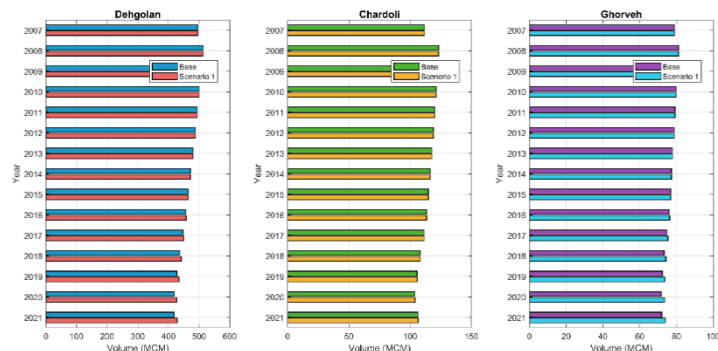


شکل (۹): تغییرات حجم آبخوان‌های محدوده قروه دهگلان در نتیجه اجرای سناریو ۱

Figure 9: Changes in Aquifer Volumes in the Qorveh-Dehgolan Area Resulting from Scenario 1

شکل (۱۰) تغییرات حجم آبخوان‌های دهگلان، چاردولی و قروه را در دوره پایه (Base) و سناریو ۲ (انسداد ۱۶۵۰ حلقه چاه غیرمجاز) از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱ مقایسه می‌کند. از ۲۰۱۶ به بعد، سناریو ۲ سرعت افت را کاهش می‌دهد که بیانگر موفقیت در کنترل برداشت غیرمجاز است. در آبخوان دهگلان، حجم در سال ۲۰۲۱ از ۴۱۸.۲ میلیون مترمکعب در پایه به ۴۲۸.۲ میلیون مترمکعب افزایش یافته (افزایش حدود

۱۰ میلیون مترمکعب)، درحالی‌که چاردولی از ۱۰۶.۲ به ۱۰۶.۵ میلیون مترمکعب (افزایش ۰.۳ میلیون مترمکعب) و قروه از ۷۲ به ۷۳.۹ میلیون مترمکعب (افزایش ۱.۹ میلیون مترمکعب) رسیده است. این بهبودها به‌ویژه در دهگلان و قروه برجسته‌تر است. اجرای طرح با انسداد ۱۶۵۰ چاه غیرمجاز طی سال ۲۰۲۱ منجر به کاهش ۱۲.۲ میلیون مترمکعب برداشت از مجموع آبخوان‌ها شده است.

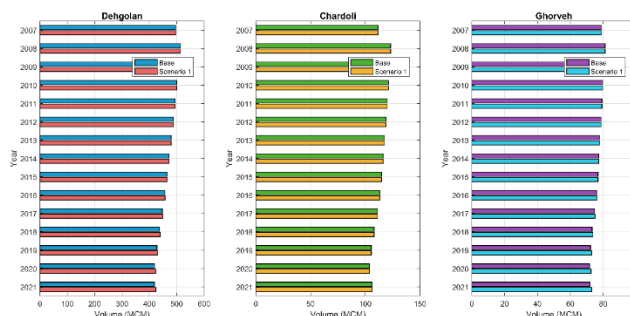


شکل (۱۰): تغییرات حجم آبخوان‌های محدوده قروه دهگلان در نتیجه اجرای سناریو ۲

Figure 10: Changes in Aquifer Volumes in the Qorveh-Dehgolan Area Resulting from Scenario 2

مترمکعب) افزایش یافته است. این تغییرات مثبت عمدتاً در سال‌های اخیر (۲۰۱۸-۲۰۲۱) آشکارتر است. اصلاح ۳۱۷۲ پروانه بهره‌برداری تا سال ۲۰۲۱، باهدف تنظیم حجم مجاز برداشت، به کاهش کلی فشار بر منابع زیرزمینی کمک کرده و مدل نشان‌دهنده حفظ حدود ۶.۳ میلیون مترمکعب منابع آب زیرزمینی در سه آبخوان است. این دستاورد با الگوی کمبودها سازگار است و نشان می‌دهد که مداخلات قانونی می‌تواند بخشی از افت (۹۰.۲ میلیون مترمکعب در ۱۴ سال) را جبران کند. بااین‌حال، اثربخشی محدود در چاردولی بر نیاز به ترکیب این رویکرد با سایر سناریوها (مانند کتورهای هوشمند) تأکید دارد.

شکل (۱۱) روند حجم آبخوان‌های دهگلان، چاردولی و قروه را از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱ در وضعیت پایه (Base) و سناریو ۳ (اصلاح و تعدیل ۳۱۷۲ پروانه بهره‌برداری) به تصویر می‌کشد. تا پیش از سال ۲۰۱۵، حجم‌ها در هر دو حالت همسان هستند، اما پس‌از آن، سناریو ۳ ثبات نسبی بیشتری فراهم آورده و شیب افت را ملایم‌تر کرده که این امر به کنترل قانونی برداشت‌ها نسبت داده می‌شود. در آبخوان دهگلان (با ذخیره اولیه ۴۹۶.۲ میلیون مترمکعب)، حجم نهایی در سال ۲۰۲۱ از ۴۱۸.۲ میلیون مترمکعب پایه به ۴۲۳.۵ میلیون مترمکعب رسیده (بهبود تقریبی ۵.۳ میلیون مترمکعب)، درحالی‌که چاردولی تغییری دیده نشد و قروه از ۷۲.۰ به ۷۳.۰ میلیون مترمکعب (بهبود ۱.۰ میلیون

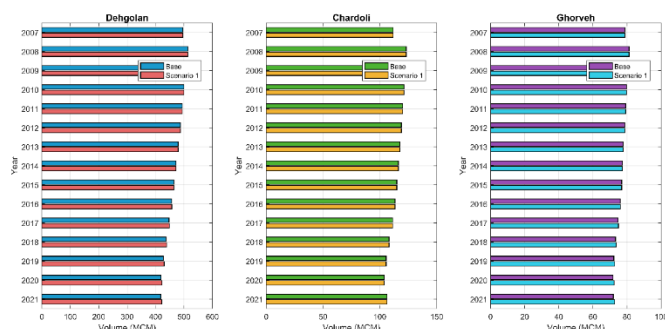


شکل (۱۱): تغییرات حجم آبخوان‌های محدوده قروه دهگلان در نتیجه اجرای سناریو ۳

Figure 11: Changes in Aquifer Volumes in the Qorveh–Dehgolan Area Resulting from Scenario 3

و آبخوان قروه از ۷۲.۰ به ۷۲.۷ میلیون مترمکعب (بهبود ۰.۷ میلیون مترمکعب) رسیده است. این پیشرفت‌ها بیشتر در آبخوان‌های بزرگ‌تر (دهگلان و قروه) مشهود است و تفاوت سالانه در سال‌های اخیر تا ۳-۴ میلیون مترمکعب در دهگلان می‌رسد. تعیین تکلیف ۸۴۴ چاه غیرمجاز باهدف قانونی‌سازی و کنترل برداشت، نتیجه‌ای در حفظ ذخیره حدود ۴.۵ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. این یافته‌ها بیانگر آن است که رویکردهای قانونی می‌تواند بخشی از افت حجم (۹۰.۲ میلیون مترمکعب در ۱۴ سال) را مهار کند.

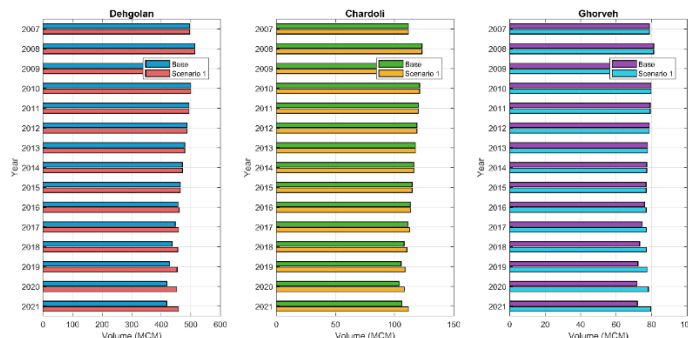
شکل (۱۲) الگوی تغییرات حجم آبخوان‌های دهگلان، چاردولی و قروه را از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱ در شرایط پایه (Base) و سناریو ۴ (تعیین تکلیف چاه‌های فاقد پروانه) به نمایش می‌گذارد. تا سال ۲۰۱۵، مسیر حجم در هر دو وضعیت همگرا است، اما پس از اجرای سناریو، منحنی سناریو ۴ بالاتر قرار گرفته و نرخ کاهش حجم را تعدیل می‌کند که این امر به منظم‌سازی برداشت‌ها از طریق قانون‌گذاری نسبت داده می‌شود. در آبخوان دهگلان، حجم در سال پایانی از ۴۱۸.۲ میلیون مترمکعب پایه به ۴۲۲.۱ میلیون مترمکعب افزایش یافته (بهبود نهایی ۳.۸ میلیون مترمکعب)، درحالی‌که در آبخوان چاردولی تغییری رخ نداده



شکل (۱۲): تغییرات حجم آبخوان‌های محدوده قروه دهگلان در نتیجه اجرای سناریو ۴

Figure 12: Changes in Aquifer Volumes in the Qorveh–Dehgolan Area Resulting from Scenario 4

شکل (۱۳) روند حجم ذخیره آبخوان‌های دهگلان، چاردولی و قروه را از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱ در وضعیت پایه (Base) و سناریو تلفیقی ۵ مقایسه می‌کند که از سال ۲۰۱۶–۲۰۲۱ اجرا شده و شامل مداخلات چندجانبه برای کنترل برداشت آب است. در این سناریو، حجم آبخوان‌ها پس از ۲۰۱۵ به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از دوره پایه حفظ شده و شیب افت سالانه را از میانگین ۶۰۴۴ میلیون مترمکعب در پایه به سطوح پایین‌تری (۲۰۶۶ میلیون مترمکعب) کاهش می‌دهد که این امر به هم‌افزایی اقدامات نظارتی و فنی نسبت داده می‌شود. آبخوان دهگلان (با حجم اولیه ۴۹۶۰۲ میلیون مترمکعب) بیشترین بهبود را نشان می‌دهد و حجم نهایی آن در ۲۰۲۱ به ۴۵۸۰۱ میلیون مترمکعب می‌رسد (در مقابل ۴۱۸۰۲ میلیون مترمکعب پایه)، درحالی‌که چاردولی از ۷۹۰۶۲ به ۱۰۶۰۲ میلیون مترمکعب و قروه از ۷۲۰۰ به ۷۹۰۶ میلیون مترمکعب افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد اجرای سناریو تلفیقی در یک بازه شش‌ساله می‌تواند آبخوان- قروه است.



شکل (۱۳): تغییرات حجم آبخوان‌های محدوده قروه دهگلان در نتیجه اجرای سناریو ۵

Figure 13: Changes in Aquifer Volumes in the Qorveh–Dehgolan Area Resulting from Scenario 5

۳- بحث و نتیجه گیری

وو^۱ و همکاران (۲۰۲۰) تأثیرات تغییرات اقلیمی بر دسترسی به آب زیرزمینی را در هفت آبخوان واقع در عرض‌های میانی مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها حاکی از آن است که حتی با افزایش طولانی مدت بارندگی، ذخایر آب زیرزمینی الزاماً رشد نمی‌کنند، زیرا نرخ تبخیر-تعرق نیز بالا خواهد رفت. در پژوهشی دیگر، اپتینگ^۲ و همکاران (۲۰۲۱) تأکید کردند که کاهش رواناب در فصل‌های تابستان و پاییز می‌تواند به کاهش تغذیه آبخوان از طریق نفوذ آب‌های سطحی منجر شود. مقدم و همکاران (۲۰۲۴) با مدل‌سازی آب زیرزمینی تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی نشان دادند که تا سال ۲۰۴۵، سطح آب زیرزمینی ممکن است ۳۰۴ درصد نسبت به دوره پایه افت کند و نرخ تغذیه آبخوان نیز تا ۱۵ درصد کاهش یابد. همچنین، دلامینی^۳ و همکاران (۲۰۲۳) با بهره‌گیری از مدل‌های گردش عمومی اتمسفر، اثرات تغییرات اقلیمی بر حوضه رودخانه بوفالو در آفریقای جنوبی را تحلیل کردند و نتیجه گرفتند که تقاضای تأمین نشده آب در این حوضه تا پایان قرن ۲۱، ۱۱۳ درصد افزایش خواهد یافت. در چنین شرایطی، گذار از رویکردهای سنتی مبتنی بر توسعه عرضه (سازهای) به سمت مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) اجتناب‌ناپذیر است. این رویکرد با تأکید بر مدیریت تقاضا، کنترل برداشت، افزایش بهره‌وری و هماهنگی بین ذی‌نفعان، امکان حفظ پایدار منابع زیرزمینی را در مناطق تحت تنش آبی فراهم می‌کند (جیکمن^۴ و همکاران، ۲۰۱۶).

یافته‌های مطالعه حاضر در محدوده قروه-دهگلان به‌طور کامل با این دیدگاه همسو است. نتایج نشان می‌دهد که این حوضه با چالش‌های جدی در مدیریت منابع آب روبرو است، جایی که کمبود سالانه حدود ۲۵-۲۶ میلیون مترمکعب در بخش کشاورزی، همراه با کاهش بارندگی (میانگین ۲۷۰ میلی‌متر) و افت جریان سدها (تا ۱۷ درصد در

سناریوهای بدبینانه مانند SSP ۸.۵)، منجر به کاهش تجمعی ۹۰.۲ میلیون مترمکعب حجم آبخوان‌ها طی ۱۴ سال شده است. این روند کاهشی که عمدتاً در ماه‌های گرم سال (با اوج کمبود ۶.۳ میلیون مترمکعب در مرداد) متمرکز است، مؤید تأثیر خشکی تابستانه بر تشدید فشار بر منابع زیرزمینی می‌باشد، موضوعی که با هشدار اپتینگ و همکاران (۲۰۲۱) درباره کاهش تغذیه آبخوان در فصول خشک همخوانی دارد. تحلیل سناریوهای مدیریتی (نصب کنتورهای هوشمند، انسداد چاه‌های غیرمجاز، اصلاح پروانه‌ها و تعیین تکلیف چاه‌ها) اثربخشی نسبی هر کدام را تأیید می‌کند. در این میان، سناریو تلفیقی (۵) با حفظ ۱۷۷ میلیون مترمکعب ذخیره اضافی از ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، بیشترین تأثیر را داشته و می‌تواند حجم آبخوان‌های چاردرولی و قروه را به سطوح اولیه (۲۰۰۷) بازگرداند، درحالی‌که آبخوان دهگلان حدود ۴۹ درصد از کاهش ۱۴ ساله خود را با اجرای تلفیقی این سناریوها در شش سال می‌تواند جبران کند و به حجم ۴۵۸.۱ میلیون مترمکعب برسد. این موفقیت، مشابه با یافته‌های دلامینی و همکاران (۲۰۲۳) که بر ضرورت اقدامات پیشگیرانه برای مقابله با افزایش تقاضای تأمین نشده تأکید داشتند، نشان می‌دهد که مدیریت یکپارچه و ترکیبی می‌تواند حتی در شرایط اقلیمی نامساعد، از تشدید بحران جلوگیری کند. این رویکرد تلفیقی، با کاهش شیب افت سالانه به ۲.۶۶ میلیون مترمکعب، بر لزوم ادغام اقدامات فنی و قانونی تأکید دارد تا فشار بر منابع سطحی و زیرزمینی کاهش یابد.

در محدوده مطالعاتی قروه-دهگلان به‌طور متوسط ۲۰ تا ۳۰ میلیون مترمکعب از نیاز سالانه بخش کشاورزی تأمین نمی‌شود که اغلب این کمبود در ماه‌های گرم سال رخ می‌دهد (جدول ۴). این کمبودها در سال‌های خشک بیشتر و در سال‌های تر کاهش می‌یابد. بخش قابل‌توجهی از افت آبخوان‌ها (مجموعاً ۹۰.۲ میلیون مترمکعب طی ۱۴ سال) به همین دلیل است و این امر اضافه برداشت از آبخوان‌ها را موجب گردیده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در سال‌هایی که کمبود بیشتر بوده (مانند ۲۰۱۷ تا

1. Wu
2. Epting
3. Dlamini
4. Jakeman

برای پایداری بلندمدت، پیشنهاد می‌شود مدل‌سازی‌های پویا با تمرکز بر سناریوهای اقلیمی میانی (مانند SSP۲.۶) و سیاست‌های اقتصادی (مانند تشویق آبیاری کارآمد) اجرا شود. در نهایت، این مطالعه بیانگر آن است که مدیریت یکپارچه می‌تواند بحران آب منطقه را مهار کند و الگویی برای سایر حوضه‌های خشک ایران ارائه دهد.

۴- منابع

- [1]. Alizadeh Moghadam, G. Golkarian, A. & Niazi, Y. (2024). Investigating the vulnerability on groundwater resources due to climate change (Case study: Taibad Plain). *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 12(2), 0-0.
- [2]. Bahrami, E., Mohammadrezapour, O., Safavi Gerdini, M., Mohammadi Sedigh, M., & Salarijazi, M. (2018). Investigation and evaluation of spatial variations of groundwater quality variables in the South of Qorveh and Dehgolan plains using geostatistics methods. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 9(1), 167-182. <https://doi.org/10.22125/iwe.2018.93441>.
- [3]. Banihabib, M. E. Najafi, M. S. & Shabestari, M. H. (2019). An integrated water resources planning model for assessment and prediction of environmental water supplying for Hawizeh wetland from Turkey, Iraq and Iran.
- [4]. Bayazidi, M. and Kaki, M. (2021). Storage Volume and Exploitation Changes of Aquifers in the Eastern Plains of the Kurdistan Province. *Journal of Ecohydrology*, 8(1), 57-72. doi: 10.22059/ije.2021.307139.1360
- [5]. Canturk, U. & Kulaç, Ş. (2021). The effects of climate change scenarios on *Tilia ssp.* in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(12), 771.
- [6]. Chakraei, I. Safavi, H. R. Dandy, G. C. & Golmohammadi, M. H. (2021). Integrated simulation-optimization framework for water allocation based on sustainability of surface water and groundwater resources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(3), 05021001.
- [7]. Demertzi, K. A. Papamichail, D. M. Georgiou, P. E. Karamouzis, D. N. & Aschonitis, V. G. (2014). Assessment of rural and highly seasonal tourist activity plus drought effects on reservoir operation in a semi-arid region of Greece using the WEAP model. *Water international*, 39(1), 23-34.
- [8]. Dlamini, N. Senzanje, A. & Mabhaudhi, T. (2023). Assessing climate change impacts on surface water availability using the WEAP model: A case study of the Buffalo river catchment, South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, 101330.
- [9]. Epting, J. Michel, A. Affolter, A. & Huguenberger, P. (2021). Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology* X, 11, 100071.
- [10]. Gaaloul, N. Eslamian, S. A. E. I. D. & Katlane, R. (2020). Impacts of climate change and water resources management in the southern mediterranean countries.
- [11]. Gao, J. Christensen, P. & Li, W. (2017). Application of the WEAP model in strategic environmental assessment: Experiences from a case study in an arid/semi-arid area in China. *Journal of environmental management*, 198, 363-371.
- [12]. Haddad, R. Banihabib, M. E. Hashemy Shahdany, S. M. Javadi, S. & Najafi, S. (2021). Supplying Environmental Water of Gavkhoni Wetland by Improving Agricultural Water Demand Management. *Journal of Ecohydrology*, 8(2), 345-355.
- [13]. Haddad, R. Najafi Marghmaleki, S. Kardan Moghaddam, H. Mofidi, M. Mirzavand, M. & Javadi, S. (2025). Improving the management of agricultural water resources to provide Gavkhuni wetland ecological water right in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 27(2), 3549-3572.
- [14]. Hempel, S. Frieler, K. Warszawski, L. Schewe, J. & Piontek, F. (2013). A trend-preserving bias correction—the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 4(2), 219-236.
- [15]. Hoogesteger, J. & Wester, P. (2017). Regulating groundwater use: The challenges of policy implementation in Guanajuato, Central Mexico. *Environmental Science & Policy*, 77, 107-113.

۲۰۲۱)، شیب افت حجم آبخوان‌ها به‌طور محسوسی تندتر شده است. در سال‌های اخیر، پروژه‌های انتقال آب برای این محدوده در نظر گرفته شده است که می‌تواند در کنار سناریوهای مدیریت تقاضا، بخشی از این کسری را جبران کند.

- [16]. Hssaisoune, M. Bouchaou, L. Sifeddine, A. Bouimetarhan, I. & Chehbouni, A. (2020). Moroccan groundwater resources and evolution with global climate changes. *Geosciences*, 10(2), 81.
- [17]. Jakeman, A. J. Barreteau, O. Hunt, R. J. Rinaudo, J. D. & Ross, A. (2016). *Integrated groundwater management* (p. 762). Springer Nature.
- [18]. Kayhomayoon, Z. Azar, N. A. Milan, S. G. Moghaddam, H. K. & Berndtsson, R. (2021). Novel approach for predicting groundwater storage loss using machine learning. *Journal of Environmental Management*, 296, 113237.
- [19]. Kayhomayoon, Z. Jamnani, M. R. Rashidi, S. Milan, S. G. Azar, N. A. & Berndtsson, R. (2023). Soft computing assessment of current and future groundwater resources under CMIP6 scenarios in northwestern Iran. *Agricultural Water Management*, 285, 108369.
- [20]. Li, X. Zhao, Y. Shi, C. Sha, J. Wang, Z. L. & Wang, Y. (2015). Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. *Ocean & Coastal Management*, 106, 97-109.
- [21]. Mahab Ghodss Consulting Engineering Company. (2014). *Studies of Azad Dam and water transfer system to Qorveh and Dehgolan plains* [Technical Report]. Iran Water and Power Resources Development Company.
- [22]. Mehraban, M. Marghmaleki, S. N. Sarang, A. & Azar, N. A. (2024). Developing climate change adaptation pathways in the agricultural sector based on robust decision-making approach (case study: Sefidroud Irrigation Network, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(4), 378.
- [23]. Mehta, V. K. Rheinheimer, D. E. Yates, D. Purkey, D. R. Viers, J. H. Young, C. A. & Mount, J. F. (2011). Potential impacts on hydrology and hydropower production under climate warming of the Sierra Nevada. *Journal of Water and Climate Change*, 2(1), 29-43.
- [24]. Milan, S. G. Kayhomayoon, Z. Azar, N. A. Berndtsson, R. Ramezani, M. R. & Moghaddam, H. K. (2023). Using machine learning to determine acceptable levels of groundwater consumption in Iran. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 388-400.
- [25]. Mourad, K. A. & Alshihabi, O. (2016). Assessment of future Syrian water resources supply and demand by the WEAP model. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 393-401.
- [26]. Mustafa, A. & Rahman, G. (2018). Assessing the spatio-temporal variability of meteorological drought in Jordan. *Earth Systems and Environment*, 2(2), 247-264.
- [27]. Raskin, P. Hansen, E. Zhu, Z. & Stavisky, D. (1992). Simulation of water supply and demand in the Aral Sea Region. *Water International*, 17(2), 55-67.
- [28]. Sachindra, D. A. Ahmed, K. Rashid, M. M. Shahid, S. & Perera, B. J. C. (2018). Statistical downscaling of precipitation using machine learning techniques. *Atmospheric research*, 212, 240-258.
- [29]. Taylor, K. E. Stouffer, R. J. & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, 93(4), 485-498.
- [30]. Wu, W. Y. Lo, M. H. Wada, Y. Famiglietti, J. S. Reager, J. T. Yeh, P. J. F. ... & Yang, Z. L. (2020). Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature communications*, 11(1), 3710.
- [31]. Yates, D. Sieber, J. Purkey, D. & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A demand, priority, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water international*, 30(4), 487-500.
- [32]. Yoon, J. Klassert, C. Selby, P. Lachaut, T. Knox, S. Avisse, N. ... & Gorelick, S. M. (2021). A coupled human–natural system analysis of freshwater security under climate and population change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(14), e2020431118.
- [33]. Zarei, B. Parizi, E. Hosseini, S. M. & Ataie-Ashtiani, B. (2022). A multifaceted quantitative index for sustainability assessment of groundwater management: application for aquifers around Iran. *Water International*, 47(3), 338-360.

Evaluating the Effectiveness of Integrated Demand Management Scenarios for Controlling Aquifer Depletion: A Case Study of the Qorveh–Dehgolan Basin

Adel Soltani^{1*}, Milad Soltani²

Receive: 26/01/2026

Accept: 20/05/2026

Extended Abstract

Introduction

Groundwater depletion has emerged as a critical challenge in arid and semi-arid regions, driven by the synergistic effects of agricultural expansion, rapid population growth, climate variability, and unsustainable abstraction practices. In Iran, where agriculture accounts for approximately 90% of total water consumption, diminishing precipitation and prolonged droughts have severely intensified pressure on aquifer systems. The Qorveh–Dehgolan basin, located in northwestern Iran, serves as a prominent example of a highly stressed system where persistent water deficits and over-exploitation of groundwater have led to significant declines in aquifer storage. Given projected climate change scenarios, reduced surface water availability and escalating water demand are expected to further exacerbate groundwater stress. Consequently, evaluating the efficacy of integrated demand-side management strategies is essential for achieving long-term water sustainability. This study aims to quantitatively assess the impacts of individual and combined demand management scenarios on groundwater storage dynamics in the Qorveh–Dehgolan basin under both historical and projected climate conditions.

Materials and Methods

The Qorveh–Dehgolan basin covers approximately 7,246 km² and includes three main alluvial aquifers: Dehgolan, Qorveh, and Charduli. Water demands are dominated by agriculture, which accounts for more than 95% of total annual water use, while domestic and industrial demands are fully supplied by groundwater. The integrated Water Evaluation and Planning (WEAP) model was applied to simulate surface water–groundwater interactions over the historical period 2007–2021. Model calibration and validation were conducted using observed streamflow data at the Hasan Khan hydrometric station, yielding satisfactory performance (NSE = 0.82 for calibration and 0.79 for validation). To assess future climate impacts, outputs from three CMIP6 global climate models under SSP2.6, SSP4.5, and SSP8.5 scenarios were downscaled using the LARS-WG weather generator for the period 2026–2045. The IHACRES rainfall–runoff model was employed to estimate future inflows to the Soural, Siah-Sang, and Ghocham reservoirs, and these inflows were incorporated into the WEAP model. Five groundwater demand management scenarios were defined and simulated: (1) installation of smart water meters, (2) sealing of illegal wells, (3) revision of groundwater abstraction permits, (4) regulation of unlicensed wells, and (5) a combined scenario integrating all measures. The impacts of these scenarios on aquifer storage trends were quantitatively evaluated.

Results

The Qorveh–Dehgolan basin, spanning approximately 7,246 km², encompasses three primary alluvial aquifers: Dehgolan, Qorveh, and Charduli. Water consumption is predominantly agricultural, accounting for over 95% of total annual demand, while domestic and industrial requirements are exclusively met through groundwater extraction. To simulate surface water–groundwater interactions, the Water Evaluation and Planning (WEAP) model was employed for the 2007–2021 historical period.

1. Faculty of Member Department of Agricultural Technology and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran, Corresponding author: soltani@pnu.ac.ir

2. Ph.D. Watershed Management and Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
DOI: 10.22052/deej.2026.258197.1133

The model was calibrated and validated against observed streamflow data at the Hasan Khan hydrometric station, demonstrating satisfactory performance (Nash–Sutcliffe Efficiency [NSE] = 0.82 and 0.79, respectively). To project future climate impacts, outputs from three CMIP6 global climate models under SSP2.6, SSP4.5, and SSP8.5 pathways were downscaled using the LARS-WG weather generator for the 2026–2045 period. Furthermore, the IHACRES rainfall–runoff model was utilized to estimate future inflows to the Soural, Siah-Sang, and Ghocham reservoirs, which were subsequently integrated into the WEAP framework. Finally, five demand-side management scenarios were simulated: (1) installation of smart water meters, (2) decommissioning of illegal wells, (3) revision of groundwater abstraction permits, (4) regulation of unlicensed wells, and (5) a combined scenario encompassing all aforementioned measures. The potential impacts of these strategies on aquifer storage trends were quantitatively assessed.

Discussion and Conclusion

Our results demonstrate that groundwater depletion in the Qorveh–Dehgolan basin is primarily driven by agricultural water deficits, a trend likely to intensify under projected climate change. While individual demand-side measures yield measurable benefits, their isolated implementation remains insufficient to effectively counteract long-term aquifer depletion. The superior performance of the combined scenario underscores the necessity of integrating regulatory, technical, and monitoring-based interventions to achieve significant groundwater recovery. Notably, the volume of groundwater saved under the combined scenario closely approximates the average annual agricultural water deficit in the basin, suggesting that comprehensive demand management can substantially mitigate pressure on both groundwater and surface water resources. This finding is particularly salient in regions characterized by pronounced summer aridity, where groundwater serves as a critical buffer against seasonal water scarcity. Ultimately, this study confirms that an integrated approach to groundwater demand management provides a robust and pragmatic pathway toward hydrological sustainability in water-stressed basins. The proposed framework not only addresses current depletion but also enhances long-term resilience to climate variability. Furthermore, these findings offer transferable insights for other arid and semi-arid regions in Iran and beyond, where comparable hydro-climatic and socio-economic conditions prevail.

Keywords: Integrated Water Resources Management, Climate Change, Aquifer, WEAP Model, Water Scarcity.