نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، بهمن - اسفند ۱۴۰۴، ص. ۹۹۳-۹۸۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 19, Feb.-Mar. 2026, p. 981-993

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی تاثیر برنامه‌های مدیریت عرضه آب بر بیلان آب با استفاده از مدل های WEAP و MODFLOW

فواد ناصرآبادی[۱]، رضا قضاوی[۲*]، مهدی ذاکری نیا[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

چکیده

رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه بخش‌های کشاورزی و صنعت باعث افزایش تقاضای آب شیرین شده است. به دلیل تغییرات اقلیمی و افزایش نیاز به آب، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی خصوصا در مناطق خشک، به شدت رو به فزونی است و این امر، افت سطح ایستابی و کاهش ذخایر آب را به دنبال داشته است. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثرات کمی برنامه‌های مدیریت مصرف آب شامل افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت بر آبخوان دهگلان به عنوان بزرگ‌ترین آبخوان موجود در استان کردستان است. برای این منظور مدل‌سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW و مدل‌سازی آب سطحی با استفاده از مدل WEAP انجام شد و سپس مقادیر تقاضا و تامین تقاضا برای هر یک از مصارف شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی تعیین گردید و نهایتا نوسانات ماهانه سطح ایستابی آبخوان مورد مطالعه در طول دوره پیش‌بینی تحت سناریوهای مرجع، افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی، با اتصال مدل‌های WEAP و MODFLOW برآورد شد. نتایج حاصل از مدل WEAP-MODFLOW، مقدار متوسط سالانه تغییرات حجم مخزن سد سنگ سیاه، در طول دوره پیش‌بینی، در سناریوهای مرجع، افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی به ترتیب برابر با ۲۰/۰۲-، ۱۰/۶۸- و ۱۱/۷۳- میلیون متر مکعب بدست آمد. تحت تاثیر توام سناریوهای مدیریتی افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی، سالانه به طور متوسط مقدار ۱۷/۶۳ میلیون متر مکعب به حجم آبخوان اضافه خواهد شد. به این ترتیب، با اجرای توام سناریوهای مدیریتی افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی، اگر چه بیلان منفی آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه صفر نخواهد شد، اما مقدار تراز سطح ایستابی در پایان دوره پیش‌بینی به مقدار آن در ابتدای دوره پیش‌بینی نزدیک خواهد شد و اجرای این سناریو مدیریتی می‌تواند باعث احیاء آبخوان شود.

واژه‌های کلیدی: آبهای زیر زمینی، بیلان آب، سناریوهای مدیریتی، مدل‌سازی آب سطحی

مقدمه

با توجه به تغییرات اقلیمی در چند دهه اخیر و اثرات این پدیده بر پارامترهای اقلیمی، الگوی آینده پدیده های هیدرولوژیکی مانند گذشته نخواهد بود. از این رو، استفاده از مدل‌های مختلف اقلیمی که می‌توانند تغییرات اقلیمی را پیش‌بینی کنند، ادغام این مدل‌ها و در نهایت استفاده از خروجی این مدل‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند ابزاری مفید برای پیش‌بینی تغییرات هیدرولوژیکی در آینده باشد (Mirani Moghadam, 2021). تغییرات اقلیمی با اثر بر مدت، شدت، نوع و زمان بارش در مناطق مختلف جهان، منابع آب، دسترسی به آب و میزان تقاضای آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Sheikha-BagemGhaleh et al., 2023). از طرف دیگر به دلیل رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه بخش‌های کشاورزی و صنعت تقاضای آب شیرین افزایش یافته است (Sheikha et al., 2018; Ostad-Ali-Askari, 2022). ترکیب افزایش تقاضای آب و کاهش دسترسی به منابع آب می‌تواند موجب افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و کاهش ذخایر آب شود (Toews and Allen., 2009). در مدیریت یکپارچه منابع آب برای این که فرآیندها و اقدامات به شکل عرضه و تقاضا در نظر گرفته شوند باید همزمان به این دو سیستم مجزا که چشم‌انداز مدیریت آب را شکل می‌دهند توجه شود (Yevjevich, 1995; Allan, 2003; Biswas, 2004; He, 2016). با توجه به محدودیت منابع آب قابل عرضه، سرمایه‌گذاری‌های بیشتر در بخش عرضه آب‌های متعارف، قادر به پاسخگویی به تقاضای در حال افزایش آب نمی‌باشد. بنابراین راه‌حل

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۲- استاد گروه مخهندسی طبیعیت، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آب وخاک، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: ghazavi@kashanu.ac.ir)

DOI: 10.22034/idj.2025.538900.2619

بحران آب را می‌توان در چگونگی توسعه و مدیریت صحیح منابع آبی جستجو نمود (Hellström et al., 2000; Cohen, 2006; Van der Steen, 2009; Mackay and Evan, 2010; Howe and Mitchell, 2012).

در دهه گذشته، بسیاری از مطالعات بر ارزیابی اثرات تغییرات آب و هوایی بر روی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی متمرکز شده‌اند (Ficklin et al., 2009; Abbaspour et al., 2009; Zhang et al., 2012: Neto et al., 2021; Azizi et al., 2021). صفوی و همکاران (۱۴۰۱)، اثرات سناریوهای مدیریتی و تغییرات اقلیمی بر اندرکنش رودخانه و آبخوان در زیرحوضه لنجانات از حوضه آبریز گاوخونی را با استفاده از مدل WEAP-MODFLOW مورد ارزیابی قرار دادند .نتایج نشان داد که در دوره آینده نزدیک، افزایش دما و بارش اتفاق خواهد افتاد و همچنین به دلیل اثرات تغذیه‌ای زیاد رودخانه بر آبخوان در محدوده مورد مطالعه و از طرف دیگر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، مدیریت تلفیقی منابع آب با کاهش سطوح زیر کشت و الگوی کشت مناسب، می‌تواند اثرات منفی کمبود منابع آب زیرزمینی را کاهش دهد. عباس و همکاران از مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-WEAP برای پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی آینده بر عرضه و تقاضای آب در حوضه آبریز رودخانه دی در انگلستان استفاده کردند (Abbas et al, 2022). ایشان در نتایج خود یادآور شدند که استفاده از مدل تلفیقی مذکور در مدیدریت یکپارچه منابع آب کاملا مفید و راه‌گشا واقع شده است.

در این پژوهش، اثرات کمی اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف آب شامل افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت بر آبخوان دهگلان به عنوان بزرگ‌ترین آبخوان موجود در استان کردستان، ارزیابی شد.کمبود آمار طولانی مدت و عدم ارزیابی های ممتد از محدودیت های انجام این پژوهش بود. با وجود مزایای قابل توجه در تلفیق مدل‌های WEAP و MODFLOW برای شبیه‌سازی یکپارچه سیستم‌های منابع آب، محدودیت‌هایی مانند اختلاف زمانی و مکانی، چالش‌های داده‌ای، و پیچیدگی‌های فنی در اتصال مدل‌ها، می‌تواند موجب افزایش عدم‌قطعیت در نتایج شود. در نتیجه، تفسیر نتایج چنین مدل تلفیقی باید با دقت و با درنظر گرفتن این محدودیت‌ها انجام گیرد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت دهگلان به عنوان بزرگترین دشت استان کردستان با مساحت ۹۸۲/۸ کیلومتر مربع، بین طول‌های جغرافیایی '۱۰ °۴۷ تا '۴۵ °۴۷ شرقی و عرض‌های جغرافیایی '۰۵ °۳۵ تا '۳۵ °۳۵ شمالی گسترده شده است. شکل (۱) موقعیت دشت و آبخوان دهگلان در حوزه آبخیز رودخانه تلوار و در استان کردستان را نمایش می‌دهد.

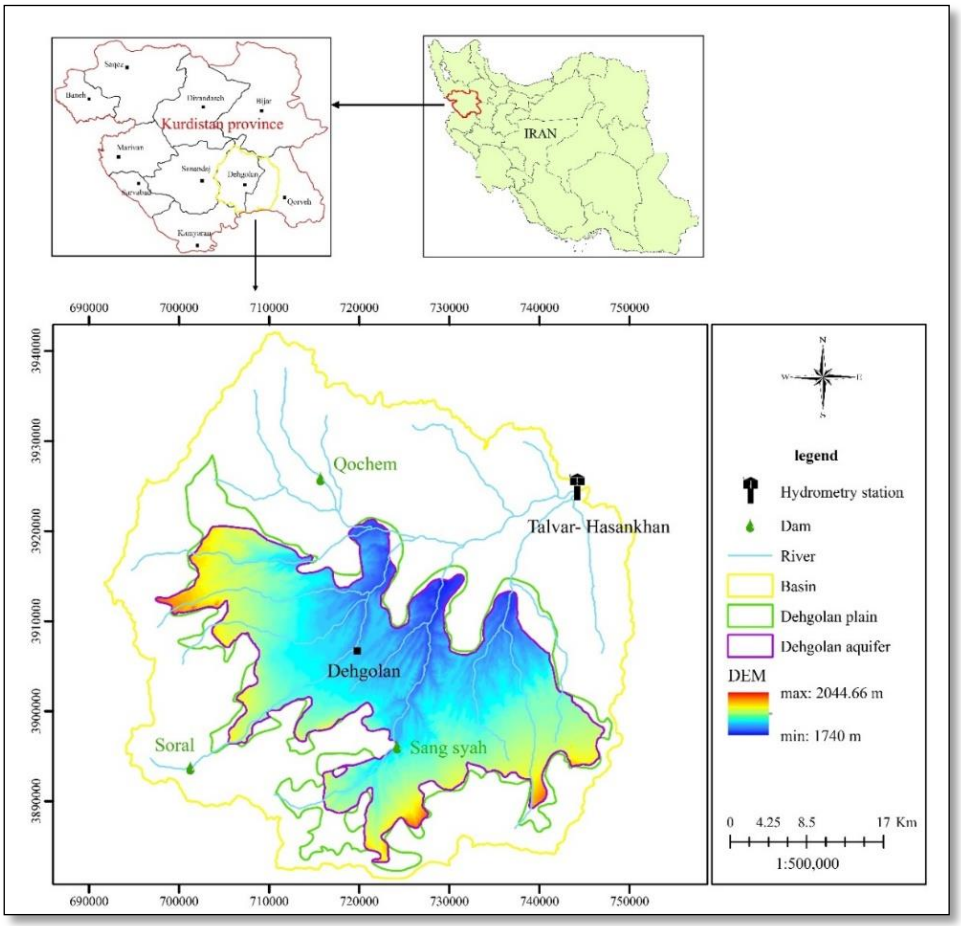
وسعت گسترش آبخوان دهگلان برابر با ۷۷۹/۸ کیلومتر مربع و مساحت حوزه آبخیز دشت تا خروجی ایستگاه هیدرومتری تلوار-حسن‌خان برابر با ۲۴۹۰/۵ کیلومتر مربع می‌باشد. حداقل، حداکثر و متوسط ارتفاع از سطح دریا در آبخوان دهگلان به ترتیب برابر با ۱۷۴۰، ۲۰۴۵ و ۱۸۵۴ متر است. کاربری‌های زراعت دیم، مرتع، زراعت آبی، مناطق مسکونی و سطوح آبی به ترتیب ۷۴/۸۱، ۱۴/۱۴، ۱۰/۱۲، ۰/۷۶ و ۰/۱۷ درصد از سطح حوزه آبخیز مورد مطالعه را شامل می‌شوند. مقدار بارندگی سالانه در دشت دهگلان و ارتفاعات مشرف بر آن به ترتیب برابر با ۳۱۹/۳۲ و ۳۶۳/۱۵ میلی‌متر و میانگین سالانه دما به ترتیب برابر با ۹/۳۹ و ۹/۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حجم کل آب مصرفی در سطح آبخوان دهگلان برابر با ۲۴۴/۷۱ میلیون متر مکعب است که ۹۶/۵۳، ۲/۱۷ و ۱/۳۰ درصد از آن به ترتیب مربوط به مصارف بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد. بر اساس نتایج مطالعات ژئوفیزیک، لوگ چاه‌های اکتشافی و آزمایشات پمپاژ و با توجه به عدم تغییرات سطح ایستابی هنگام حفاری، مشخص شده است که آبخوان دهگلان از نوع آبخوان آزاد است.

روش انجام مطالعه

در این پژوهش برای مدل‌سازی تاثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیر زمینی، از مدل MODFLOW در رابط گرافیکی GMS[1] استفاده شد که نتایج حاصل در مقاله ای تحت عنوان " ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی بر وضعیت کمی آب‌های زیرزمینی آبخوان دهگلان با استفاده از مدل MODFLOW " به چاپ رسیده است (ناصرآبادی و همکاران، ۱۴۰۴). در این مقاله نتایج حاصل از اتصال مدل WEAP-MODFLOW معرفی شده است. برای استفاده از این مدل‌ها، مجموعه‌ای از فرضیات به شرح زیر در نظر گرفته شد(فرضیات مدل WEAP: مدل WEAP بر اساس تعادل بین عرضه و تقاضای آب در بازه‌های زمانی ماهانه عمل می‌کند و فرض می‌شود که تخصیص آب به مصارف مختلف (شرب، کشاورزی، صنعت، محیط‌زیست) بر اساس اولویت و در دسترس بودن منابع انجام می‌گیرد، منابع آب سطحی (رودخانه‌ها، سدها) و آب زیرزمینی در قالب یک شبکه یکپارچه مدل‌سازی شده و فرض می‌شود تبادلات بین اجزای سیستم با دقت قابل قبول قابل شبیه‌سازی است، تقاضای آب هر بخش به صورت دینامیکی و تابعی از عوامل مشخص از جمله جمعیت، راندمان مصرف، الگوی کشت و شرایط آب و هوایی تعریف می‌شود، مدل‌سازی سناریوها بر مبنای تغییر پارامترهای مدیریتی (مانند راندمان آبیاری و الگوی کشت) انجام شده و فرض می‌شود سایر

1. Groundwater Modeling System

شرایط ثابت باقی بمانند. فرضیات مدل MODFLOW: جریان آب زیرزمینی در محیط اشباع بر اساس معادله دارسی مدل‌سازی می‌شود و فرض می‌شود که محیط متخلخل همگن و ایزوتروپیک یا با ناهمگنی محدود است، مدل به صورت عددی و با استفاده از روش تفاضل محدود در یک شبکه منظم سه‌بعدی اجرا شده و هر سلول دارای خصوصیات هیدرولیکی مشخص و ثابت در طول دوره شبیه‌سازی می‌باشد، مرزهای مدل به صورت بسته یا مشخص تعریف شده‌اند و فرض می‌شود تبادلات جریان در مرزها به درستی تعیین شده باشد،تغذیه آبخوان از طریق نفوذ جریان سطحی، بارندگی موثر و جریان از مرزهای مجاور لحاظ می‌شود و تبخیر از سطح ایستابی به طور مستقیم در مدل در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل ۱- موقعیت دشت و آبخوان دهگلان در کشور ایران و در استان کردستان

در اتصال با مدل WEAP، خروجی‌های مربوط به برداشت آب برای مصارف مختلف به عنوان ورودی به مدل MODFLOW منتقل می‌شوند و فرض می‌شود که این اتصال باعث حفظ سازگاری زمانی و مکانی بین دو مدل می‌گردد.از لحاظ تابع هدف WEAP یک مدل مدیریتی-برنامه‌ریزی است که تابع هدف آن بر پایه‌ی تخصیص بهینه آب بین مصارف مختلف با حداقل کمبود تعریف می‌شود و MODFLOW یک مدل فیزیکی است که تابع هدف آن حل دقیق معادله جریان زیرزمینی برای پیش‌بینی رفتار آبخوان است و تابع هدف صریح به مفهوم بهینه‌سازی ندارد، بلکه به دنبال حل معادلات و تعادل جرمی است.

برای تعیین چارچوب اصلی مدل WEAP، ابتدا نقشه‌های پایه موردنیاز مدل شامل حوزه آبخیز مورد مطالعه جهت برنامه‌ریزی منابع آب، مرزها، رودخانه‌ها، منابع آب سطحی و زیرزمینی و تمامی عوارض مرتبط، در محیط ArcMap تهیه شد. از لایه‌های رستر یا وکتور GIS می‌توان به عنوان نقشه پیش زمینه در مدل WEAP استفاده کرد. در مدل WEAP، با استفاده از ابزارهای موجود و بر اساس نقشه‌های پیش زمینه، مسیر رودخانه‌ها، محل ایستگاه‌های هیدرومتری، محل سدها، محل شهرها و روستاها، محل کارخانجات و صنایع بزرگ، کانال‌های برگشت آب شهری، زهکش‌های کشاورزی، گره مربوط به آبخوان و غیره، رقومی شدند. نقطه شروع یک تحلیل مدیریت منابع

آب در مدل WEAP، ایجاد تقاضاهای حوزه آبخیزحوضه آبریز است. به هر تقاضا توسط کاربر اولویتی از بین اعداد صحیح ۱ به عنوان بیش‌ترین اولویت تا ۱۰۰ به عنوان کم‌ترین اولویت نسبت داده می‌شود. سپس هر تقاضا به منابع عرضه موجود متصل می‌گردد و برای هر تقاضا ترجیحات منبع عرضه نیز توسط کاربر مشخص می‌شود. یعنی تعیین می‌گردد که آیا ترجیح سایت تقاضا برای دریافت آب از منابع آب سطحی است یا آب زیرزمینی. تخصیص منابع به اولویت‌های مختلف به گونه‌ای است که ابتدا تمامی نیازهای مربوط به تقاضای با اولویت بیشتر تامین می‌شود، سپس اولویت‌های کمتر تحت پوشش قرار می‌گیرند. برای تقاضاهای با اولویت‌های مساوی، در شرایط کمبود آب مدل سعی می‌کند درصد مساوی از نیازهای هر تقاضا را برآورد کند. ممکن است یک سایت برای تامین تقاضای خود به منابع مختلف دسترسی داشته باشد. ترجیح برداشت از این منابع تعیین می‌کند که برای تامین تقاضا ابتدا باید به سراغ کدام یک رفت (Yates et al., 2005).

در مدل شبیه‌سازی سیستم، در بخش آب سطحی اولویت تخصیص نیازها بر اساس سیاست‌های منطقه‌ای بررسی شد. در این راستا اولویت اول تخصیص، نیاز شرب، اولویت دوم نیاز صنایع بزرگ و اولویت سوم نیاز اراضی کشاورزی داخل منطقه در نظر گرفته شد. در بخش آب زیرزمینی نیز اولویت‌های تخصیص به صورت اولویت‌های در نظر گرفته شده برای آب سطحی در نظر گرفته شد.

با توجه به شرایط منطقه، در کل سیستم، برداشت مستقیم از رودخانه به عنوان اولویت اول و تامین آب از آبخوان از طریق چاه‌های بهره‌برداری به عنوان اولویت دوم در نظر گرفته شد. در این صورت در سال‌های تر و خشک ابتدا منبع آب سطحی استفاده می‌شود و با توجه به کمبود آب سطحی در سال‌های خشک مابقی نیاز با توجه به محدودیت‌های برداشت، از آب زیرزمینی تامین می‌گردد. داده‌های موردنیاز مدل WEAP به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول، داده‌های عمومی شامل اطلاعات سال پایه، ماه شروع شبیه‌سازی، طول دوره برنامه‌ریزی، گام‌های زمانی، تنظیمات مدل و غیره می‌باشد. بر این اساس با توجه به این که طول دوره شبیه‌سازی در دو مدل آب سطحی و آب زیرزمینی باید برابر و ضریبی از ۱۲ ماه باشد و نظر به این که در بخش آب زیرزمینی، تعداد سال‌های شبیه‌سازی از ابتدای سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷ تا پایان سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ می‌باشد، طول دوره شبیه‌سازی در مدل WEAP نیز از ابتدای سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷ تا پایان سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ در نظر گرفته شد. گام زمانی شبیه‌سازی، ماهانه و واحد محاسباتی متریک در نظر گرفته شد. در تنظیمات مدل تعداد روزهای ماه میلادی، به صورت قراردادی به ترتیب برابر با تعداد روزهای ماه شمسی متناظر وارد شد تا در محاسبات اختلالی ایجاد نشود.

دسته دوم داده‌ها، شامل سری‌های زمانی داده‌های ثبت شده هیدرولوژیکی و هواشناسی و اطلاعات مربوط به نیاز ماهانه مصارف کشاورزی، شرب و صنعت، اطلاعات مخازن و محل‌های برداشت، ضرایب و پارامترهای موردنیاز و غیره است که غالب آن‌ها به صورت فایل متنی و طبق دستورالعمل تنظیم فایل‌های ورودی آماده و با استفاده از قابلیت فراخوانی خودکار در قسمت توابع مدل، به مدل معرفی شدند.

اتصال مدل MODFLOW به مدل WEAP

مدل WEAP، یک منبع آب زیرزمینی را به صورت یک مخزن با یک حجم ماکزیمم و یک حجم مینیمم در نظر می‌گیرد و سایر جزییات مربوط به آب‌های زیرزمینی در مدل WEAP دیده نمی‌شود. اما اگر از یک مدل آب زیرزمینی مانند MODFLOW کمک گرفته شود تا بتوان یک آبخوان را به صورت گسترده مدل نمود، آنگاه این امکان وجود دارد که مدل MODFLOW در مدل WEAP مورد استفاده قرار گیرد و سناریوهای مختلف در آن تدوین شود. این بدین مفهوم است که مدل کردن جزییات یک آبخوان در مدل WEAP امکان‌پذیر نیست، اما فراخوانی یک مدل آبخوان گسترده در آن ممکن است. اتصال مدل MODFLOW و مدل WEAP این امکان را فراهم می‌آورد که مقادیر محاسبه شده توسط مدل WEAP در خصوص نفوذهای زیرزمینی، سطح آب موجود در رودخانه‌ها، برداشت از آب‌های زیرزمینی و رواناب‌های سطحی به صورت ورودی به MODFLOW ارسال شود و پس از محاسبه توسط مدل MODFLOW، اطلاعاتی نظیر ارتفاع سطح ایستابی و جریان بین آب سطحی و زیرزمینی به عنوان ورودی گام بعدی محاسبات به مدل WEAP ارسال شود.

بعد از ورود داده‌ها به مدل WEAP و اجرای مدل، عملیات آنالیز حساسیت پارامترها جهت تعیین پارامترهای حساس مدل WEAP انجام شد. در مرحله بعد، عملیات واسنجی مدل از ابتدای سال آبی ۱۳۶۵-۱۳۶۶ تا پایان سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ در محل ایستگاه هیدرومتری تلوار- حسن‌خان در محیط نرم‌افزار WEAP انجام شد. درستی یا نادرستی ترکیب پارامترهای بکار رفته در مدل واسنجی شده، در مرحله بعد، یعنی مرحله اعتبارسنجی مدل WEAP انجام شد. پس از انجام مرحله اعتبارسنجی، برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب و تحلیل سیاست‌ها با اتصال مدل‌های WEAP و MODFLOW انجام شد. در این پژوهش، تعداد ۴سناریو مدیریتی در نظر گرفته شد: ۱) سناریو مرجع بیانگر ادامه وضع موجود بدون تغییر اساسی در سیاست‌های مدیریتی در آینده است۲) سناریو افزایش راندمان آبیاری که در این سناریو راندمان آبیاری در اراضی کشاورزی منطقه در طول دوره پیش‌بینی، از طریق روش آبیاری تحت فشار افزایش پیدا خواهد کرد ولی سایر عوامل بدون تغییر باقی خواهد کاند. ۳) سناریو تغییر الگوی کشت که در این سناریو راندمان آبیاری در اراضی کشاورزی

منطقه در طول دوره پیش‌بینی، بدون ارتقا باقی خواهد ماند، سطح زیر کشت تغییری نخواهد کرد ولی الگوی کشت در دوره پیش‌بینی، به سمت محصولات کم آب طلب، تغییر خواهد کرد. با توجه به این که تغییر الگوی کشت باغی دشوار است لذا تصمیم گرفته شد که در منطقه، فقط بر روی تغییر نظام کشت زراعی بحث شود.۴) سناریو تلفیقی افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت که در این سناریو راندمان آبیاری در اراضی کشاورزی منطقه در طول دوره پیش‌بینی، از طریق روش آبیاری تحت فشار افزایش پیدا خواهد کرد، الگوی کشت در دوره پیش‌بینی، به سمت محصولات کم آب طلب، تغییر خواهد کرد ولی سطح زیر کشت تغییری نخواهد کرد، توسعه سازه‌ای آتی حوزه آبخیز حوضه آبریز به بهره‌برداری نخواهد رسید، اولویت تخصیص آب بر اساس مدیریت تاریخی در حوزه آبخیز حوضه آبریز خواهد بود، رشد جمعیت منطقه، با نرخ رشد کنونی لحاظ خواهد شد، در طول دوره پیش‌بینی، الگوی برداشت از آب سطحی و زیرزمینی مطابق با قبل خواهد بود و رهاسازی جریان سطحی مشابه با روند قبل یعنی ابتدای سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷ تا پایان سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ خواهد بود. در تمامی این سناریوها، طول دوره آتی پیش‌بینی، با توجه به محدودیت اتصال مدل WEAP با مدل MODFLOW، به مدت ۱۰ سال و از ابتدای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ تا سال آبی ۱۴۰۶-۱۴۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب و تحلیل سیاست‌ها

برای انجام آنالیز حساسیت روش OAT مورد استفاده قرار گرفت. در روش OAT در هر بار اجرای مدل یک پارامتر تغییر کرده و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند (رمجیو و کنفسور، ۲۰۰۷). این روند برای تمام پارامترها تکرار می‌شود و در نهایت پارامترهایی که تغییر آن‌ها، بیشترین تغییر را در تابع هدف ایجاد می‌کنند، به عنوان حساس‌ترین پارامترها شناسایی می‌شوند(جدول ۱). به منظور تحلیل حساسیت پارامترهای مدل WEAP، ابتدا برای هر پارامتر، یک بازه منطقی با توجه به کاربری اراضی، پوشش گیاهی، نوع خاک و شیب حوزه آبخیز حوضه آبریز مورد مطالعه در نظر گرفته شد. مدل WEAP با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، برای پنج مقدار انتخابی درون بازه مذکور، اجرا و مقدار تابع نش- ساتکلیف برای هر مقدار، محاسبه شد. این روند برای تمامی پارامترها تکرار شد. در جدول (۱) پارامترهای ورودی روش رطوبت خاک، دامنه انتخابی برای هر پارامتر و مقادیر ضریب نش- ساتکلیف ارائه شده است.

جدول ۱- دامنه انتخابی پارامترهای ورودی روش رطوبت خاک به همراه مقادیر تابع هدف نش- ساتکلیف

پارامتر	واحد	بازه انتخابی	E_{NS}			
			ابتدای بازه	مقدار میانی	مقدار میانی	انتهای بازه
سطح زیر کشت اراضی	هکتار	۴۰۰۰-۲۰۰۰	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹
مصرف آب آبیاری اراضی	متر مکعب در هکتار	۱۰۰-۵۰	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹
عامل مقاومت در برابر جریان	-	۱۰-۰	۰/۱۰	۰/۵۶	۰/۳۲	۰/۱۴
ضریب کشت گیاه	-	۰-۱/۳	۰/۰۴	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۲۶
جهت ترجیحی جریان	-	۱-۰	۰/۰۷	۰/۴۱	۰/۱۷	۰/۲۱
ظرفیت آب لایه زیرین	میلیمتر	۳۵۰۰۰۰-۱۰۰۰۰	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۳۰
ظرفیت آب ناحیه ریشه	میلی‌متر در روز	۱۲۰۰-۱۰۰	۰/۱۲	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۱۹
ضریب هدایت هیدرولیکی لایه زیرین	میلی‌متر در روز	۳۵۰-۱۰	۰/۲۶	۰/۳۰	۰/۳۵	۰/۳۵
حجم اولیه آب لایه زیرین	درصد	۳۰-۵	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۶
حجم اولیه آب ناحیه ریشه	درصد	۴۰-۵	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۶
ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه	میلی‌متر در روز	۲۰۰-۱۰	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۴۱

بر اساس نتایج حاصل (جدول۱) و توجه به این که بزرگ بودن مقدار عددی تابع هدف نش- ساتکلیف برای یک پارامتر، نشان‌دهنده حساس‌تر بودن آن پارامتر است، از مجموع ۱۱ پارامتر در نظر گرفته شده برای مدل WEAP، به ترتیب پنج پارامتر عامل مقاومت در برابر جریان، ظرفیت آب ناحیه ریشه، ضریب کشت گیاه، جهت ترجیحی جریان و ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه، به عنوان پارامترهای حساس، انتخاب و در مرحله واسنجی از این پارامترها استفاده شد. بعد از انجام عملیات آنالیز حساسیت پارامترها و تعیین پارامترهای حساس، عملیات واسنجی مدل WEAP به صورت اتوماتیک و از ابتدای سال آبی ۱۳۶۶-۱۳۶۵ تا پایان سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ و عملیات اعتبارسنجی مدل از ابتدای سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ تا پایان سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ یعنی یک دوره ۲۴ ماهه در محل ایستگاه هیدرومتری موجود در خروجی حوزه آبخیز رودخانه تلوار یعنی ایستگاه هیدرومتری تلوار- حسن‌خان انجام شد. جدول (۲) ضرایب ارزیابی مدل WEAP

در شبیه‌سازی حجم جریان سطحی را نشان می دهد.

جدول ۲- ضرایب ارزیابی مدل WEAP در شبیه‌سازی حجم جریان سطحی

مرحله	ضرایب ارزیابی			
	R^2	E_{NS}	PBIAS	MAE
واسنجی	۰/۹۵۸	۰/۹۵۷	۴/۶۲۵	۲/۲۵۹
اعتبارسنجی	۰/۸۳۷	۰/۷۶۱	۳۰/۸۴۷	۳/۱۳۴

بر اساس نتایج ارائه شده مقدار ضرایب تبیین و نش- ساتکلیف در مرحله واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۹۵۸ و ۰/۹۵۷ و در مرحله اعتبار سنجی به ترتیب برابر ۰/۸۳۷ و ۰/۷۶۱ بدست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل WEAP در سبیه سازی است.

نتایج کمی حاصل از مدل WEAP-MODFLOW در طول دوره پیش‌بینی

نتایج حاصل از اجرای سناریو مرجع

سناریو مرجع بیانگر ادامه وضع موجود بدون تغییر اساسی در سیاست‌های مدیریتی در آینده است. در این سناریو با لحاظ رشد جمعیت منطقه با نرخ رشد کنونی، فرض بر این است که راندمان آبیاری، الگوی کشت، سطح زیر کشت و اولویت تخصیص آب در منطقه در طول دوره پیش‌بینی، بدون تغییر باقی خواهد ماند و توسعه سازه‌ای آتی حوزه آبخیز مورد مطالعه به بهره‌برداری نخواهد رسید. با استفاده از مدل WEAP-MODFLOW مقادیر تقاضا و تامین تقاضا برای هر یک از مصارف شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی و همچنین نوسانات ماهانه سطح ایستابی آبخوان دهگلان در طول دوره پیش‌بینی، برآورد شد.

متوسط ماهانه حجم تقاضا برای هر یک از مصارف شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی در طول دوره ۱۰ ساله پیش‌بینی، شبیه‌سازی شد و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

بر اساس نتایج حاصل از اجرای سناریو مرجع، مقدار متوسط سالانه حجم تقاضا در دوره پیش‌بینی برای بخش کشاورزی برابر با ۲۱۱/۲۲ میلیون متر مکعب برآورد شد. آبیاری محصولات کشاورزی در دشت دهگلان معمولا با خاتمه بارندگی‌ها یعنی در پایان فروردین ماه که مصادف با اواسط ماه آوریل است، شروع می‌شود. همان‌گونه که در جدول (۳) دیده می‌شود، مقدار مصرف آب جهت آبیاری محصولات کشاورزی در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور که به ترتیب مصادف با ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست است، به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

جدول ۳- متوسط ماهانه حجم تقاضا (میلیون متر مکعب) حاصل از اجرای سناریو مرجع در دوره پیش‌بینی

نوع مصرف	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	جمع
شرب روستایی	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۲/۱۹
شرب شهری	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۶	۲/۲۸
صنعت	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۴۶
کشاورزی	۹/۷۵	۱/۵۲	۰/۴۰	۰	۰/۰۶	۰	۹/۴۰	۲۷/۱۸	۴۶/۵۰	۴۹/۶۲	۴۴/۰۰	۲۲/۷۸	۲۱۱/۲۲
زیست محیطی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

با توجه به این که معمولا ۲۰ درصد از متوسط ماهانه دراز مدت آورد رودخانه، به عنوان سهم نیاز زیست محیطی همان ماه در نظر گرفته می‌شود (وزارت نیرو، ۱۳۹۰) و توجه به سهم عظیم بخش کشاورزی در مصرف آب‌های سطحی و زیرزمینی در دشت دهگلان، در عمل مقدار تقاضا برای نیاز زیست محیطی در حد خیلی ناچیز چند ده هزارم میلیون متر مکعب در هر ماه بدست آمد و به همین دلیل، در جدول (۳) برابر با صفر ارائه شده است.

متوسط ماهانه درصد تامین نیاز برای هر یک از مصارف شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی در طول دوره پیش‌بینی، شبیه‌سازی شد و نتایج در جدول(۴) ارائه شده است.

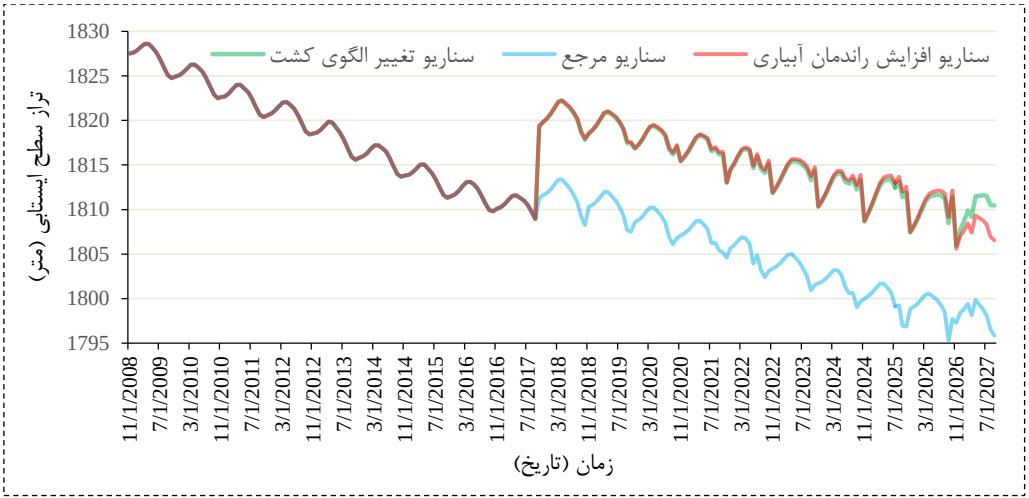
جدول ٤- متوسط ماهانه درصد تامین نیاز حاصل از اجرای سناریو مرجع در دوره پیش‌بینی

نوع مصرف	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	سالانه
شرب روستایی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۳/۵۶	۹۹/۴۶
شرب شهری	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۳/۵۶	۹۹/۴۶
صنعت	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۳/۵۲	۹۹/۴۶
کشاورزی	۹۹/۵۰	۹۹/۰۸	۷۲/۷۲	۱۰۰	۲۱/۹۱	۱۰۰	۹۷/۸۸	۹۷/۸۸	۹۷/۸۸	۹۷/۸۸	۹۷/۸۸	۹۳/۱۰	۸۹/۶۴
زیست محیطی	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۴)، در سناریو مرجع از کل نیاز سالانه شبیه‌سازی شده برای شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی به ترتیب مقدار ۹۹/۴۶، ۹۹/۴۶، ۹۹/۴۶، ۸۹/۶۴ و ۹۱/۶۷ درصد تامین خواهد شد. کل نیاز شرب روستایی، شرب شهری و صنعت از منابع آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود. از کل نیاز کشاورزی، حدود ۱۱ درصد از آن از منابع آب‌های سطحی و مابقی از منابع آب‌های زیرزمینی تامین خواهد شد. نتایج ارائه شده در جدول (۴) نشان می‌دهد، در ماه‌هایی که مقدار تقاضای پیش‌بینی شده، به صورت ۱۰۰ درصد تامین نشده است، بایستی مقدار تقاضای تامین نشده از طریق اضافه برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی تامین شود. اضافه برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی، افت سطح ایستابی را در طول دوره پیش‌بینی، به همراه خواهد داشت. بر اساس نتایج حاصل، مقدار متوسط ماهانه درصد تامین نیاز زیست محیطی در ماه‌های مختلف برابر با ۹۱/۶۷ درصد است. دلیل این امر نیز همان‌طور که در بخش‌های قبلی مورد اشاره قرار گرفت، این است که با توجه به سهم عظیم بخش کشاورزی در مصرف آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت دهگلان، عملا مقدار تقاضای در نظر گرفته شده برای نیاز زیست محیطی، توسط بخش کشاورزی مصرف می‌شود.

تغییرات تراز سطح ایستابی در دوره پیش‌بینی

نتایج شبیه‌سازی نوسانات تراز سطح ایستابی در طول دوره پیش‌بینی تحت سناریو مرجع، به صورت هیدروگراف آبخوان از مدل استخراج شد. شکل (۲) تغییرات ماهانه تراز سطح ایستابی را که از میانگین سلول‌های شبکه تفاضل محدود در مدل ریاضی MODFLOW حاصل شده است، نمایش می‌دهد.



شکل ۲- هیدروگراف آبخوان در طول دوره پیش‌بینی تحت سناریوهای مختلف مدیریت تقاضا

تحت سناریو مرجع، تراز مطلق سطح ایستابی در مهر ماه سال آبی ۱۴۰۶-۱۴۰۵ برابر با ۱۷۹۷/۷۵ متر و در مهر ماه سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ برابر با ۱۸۱۱/۲۶ متر و اختلاف آن‌ها برابر با ۱۳/۵۱- متر بدست آمد. متوسط سالانه تغییرات تراز سطح آب از تقسیم عدد ۱۳/۵۱- متر بر تعداد سال‌های دوره پیش‌بینی یعنی ۱۰ سال بدست می‌آید و برابر با ۱/۳۵۱- متر می‌باشد. مقدار متوسط تغییرات سالانه حجم مخزن آبخوان دهگلان از حاصل ضرب مساحت آبخوان یعنی ۷۷۹/۸ کیلومتر مربع، مقدار آبدهی ویژه یعنی ۰/۰۱۹ و میزان متوسط تغییرات سالانه تراز سطح آب یعنی عدد ۱/۳۵۱- متر بدست می‌آید و برابر با ۲۰/۰۲- میلیون متر مکعب است. به عبارت واضح‌تر، تحت سناریو مرجع و در طول دوره پیش‌بینی، سالانه به طور متوسط مقدار ۲۰/۰۲ میلیون متر مکعب از حجم آبخوان کاسته می‌شود. این نتایج در مورد سناریو وجود سد سنگ سیاه و تاثیر آن بر نوسانات سطح ایستابی آبخوان مورد مطالعه نیز بدست آمد.

در این سناریو با لحاظ رشد جمعیت منطقه با نرخ رشد کنونی، فرض شد راندمان آبیاری در اراضی کشاورزی منطقه در طول دوره پیش‌بینی، از طریق روش آبیاری تحت فشار افزایش پیدا خواهد کرد. در پژوهش انجام شده توسط عباسی و همکاران (۱۳۹۵)، متوسط راندمان کاربرد آب آبیاری در استان کردستان برابر با ۴۲/۶ درصد بدست آمد. بدین ترتیب در سناریو افزایش راندمان آبیاری، فرض بر این قرار گرفت که با استفاده از روش آبیاری تحت فشار، راندمان کاربرد آب آبیاری از ۴۰ درصد به ۸۰ درصد افزایش یابد.

در سناریو افزایش راندمان آبیاری، فرض شد که الگوی کشت، سطح زیر کشت و اولویت تخصیص آب در منطقه در طول دوره پیش‌بینی بدون تغییر باقی خواهد ماند و توسعه سازه‌ای آتی حوزه آبخیز مورد مطالعه به بهره‌برداری نخواهد رسید. با استفاده از مدل WEAP-MODFLOW مقادیر تقاضا و تامین تقاضا برای هر یک از مصارف شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی و همچنین نوسانات ماهانه سطح ایستابی آبخوان دهگلان در طول دوره پیش‌بینی، برآورد شد.

متوسط ماهانه حجم تقاضا برای هر یک از مصارف شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی در طول دوره پیش‌بینی، شبیه‌سازی شد و نتایج در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- متوسط ماهانه حجم تقاضا (میلیون متر مکعب) حاصل از اجرای سناریو افزایش راندمان آبیاری

نوع مصرف	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	جمع
شرب روستایی	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۲/۱۹
شرب شهری	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۶	۲/۲۸
صنعت	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۴۶
کشاورزی	۴/۲۱	۰/۶۶	۰/۱۷	۰	۰/۰۳	۰	۴/۰۶	۱۱/۷۳	۲۰/۰۷	۲۱/۴۲	۱۸/۹۹	۹/۸۴	۹۱/۱۸
زیست محیطی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

بر اساس نتایج حاصل از اجرای سناریو افزایش راندمان آبیاری، مقدار متوسط سالانه حجم تقاضا در دوره پیش‌بینی برای بخش کشاورزی برابر با ۹۱/۱۸ میلیون متر مکعب برآورد شد. مقایسه میزان تقاضای پیش‌بینی شده برای بخش کشاورزی در سناریو افزایش راندمان آبیاری با سناریو مرجع، نشان از کاهش ۵۷ درصدی میزان تقاضا در سناریو افزایش راندمان آبیاری دارد. مقدار تقاضا با افزایش راندمان آبیاری رابطه معکوس دارد، به طوری که هر چه میزان راندمان آبیاری افزایش یابد، میزان بهره‌وری در واحد سطح افزایش یافته و از میزان تقاضا کاسته می‌شود.

مقدار ماهانه درصد تامین نیاز برای هر یک از مصارف شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی در طول دوره پیش‌بینی، شبیه‌سازی شد و نتایج در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ٦- متوسط ماهانه درصد تامین نیاز برای مصارف مختلف در طول دوره پیش‌بینی

نوع مصرف	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	جمع
شرب روستایی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
شرب شهری	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
صنعت	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
کشاورزی	۹۸/۸۳	۹۷/۸۸	۹۰/۶۷	۱۰۰	۲۹/۷۱	۱۰۰	۹۹/۰۸	۹۹/۰۸	۹۹/۰۸	۹۹/۰۸	۹۹/۰۸	۹۹/۰۸	۹۲/۶۳
زیست محیطی	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷

به طور کلی در سناریو افزایش راندمان آبیاری، از کل نیاز شبیه‌سازی شده برای شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی به ترتیب مقدار ۱۰۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۹۲/۶۳ و ۹۱/۶۷ درصد تامین خواهد شد. کل نیاز شرب روستایی، شرب شهری و صنعت از منابع آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود. از کل نیاز کشاورزی، حدود ۱۱ درصد از آن از منابع آب‌های سطحی و مابقی از منابع آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود.

تغییرات تراز سطح ایستابی در دوره پیش‌بینی

تحت سناریو افزایش راندمان آبیاری، تراز مطلق سطح ایستابی در مهر ماه سال آبی ۱۴۰۶-۱۴۰۵ برابر با ۱۸۱۲/۱۵ متر و در مهر ماه سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ برابر با ۱۸۱۹/۳۶ متر و اختلاف آن‌ها برابر با ۷/۲۱- متر است. متوسط تغییرات سالانه تراز سطح آب برابر با ۰/۷۲۱- متر می‌باشد. مقدار متوسط تغییرات سالانه حجم مخزن آبخوان دهگلان از حاصل ضرب مساحت آبخوان یعنی ۷۷۹/۸ کیلومتر مربع، مقدار آبدهی ویژه یعنی ۰/۰۱۹ و میزان متوسط تغییرات سالانه تراز سطح آب یعنی عدد ۰/۷۲۱- متر به دست می‌آید و برابر با ۱۰/۶۸- میلیون متر مکعب است(شکل۲)

مقدار متوسط سالانه تغییرات حجم مخزن در طول دوره پیش‌بینی، در سناریوهای مرجع و افزایش راندمان آبیاری به ترتیب برابر با ۲۰/۰۲- و ۱۰/۶۸- میلیون متر مکعب بدست آمد. تاثیر افزایش راندمان آبیاری در تغذیه آبخوان مورد مطالعه، از اختلاف قدر مطلق دو عدد ۲۰/۰۲ و ۱۰/۶۸ یعنی عدد ۹/۳۴ میلیون متر مکعب قابل تشخیص است. به عبارت دیگر، در صورت افزایش راندمان

آبیاری از ۴۰ درصد به ۸۰ درصد، سالانه به طور متوسط مقدار ۹/۳۴ میلیون متر مکعب به حجم آبخوان اضافه خواهد شد.

نتایج حاصل از اجرای سناریو تغییر الگوی کشت

در این سناریو با لحاظ رشد جمعیت منطقه با نرخ رشد کنونی، فرض شد الگوی کشت در دوره پیش‌بینی، به سمت محصولات کم آب طلب، تغییر خواهد کرد. با توجه به این که تغییر الگوی کشت باغی دشوار است لذا تصمیم گرفته شد که در منطقه، فقط بر روی تغییر نظام کشت زراعی بحث شود.

دشت دهگلان یکی از دشت‌های حاصل‌خیز و کانون تولید محصولات کشاورزی در استان کردستان محسوب می‌شود، به طوری که ۵ درصد از محصول سیب‌زمینی کشور را تولید می‌کند (وزارت نیرو، ۱۳۹۵). تمایل کشاورزان به توسعه سطح زیر کشت محصولات آب‌بر به ویژه محصول سیب‌زمینی موجب بهره‌برداری شدید از منابع آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن، افت شدید سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی آبخوان دهگلان شده است. در سناریو تغییر الگوی کشت زراعی فرض شد که محصول سیب‌زمینی با محصولات کلزا و گندم که آب کمتری نیاز دارندجایگزین خواهد شد.

متوسط ماهانه حجم تقاضا برای هر یک از مصارف شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی در طول دوره پیش‌بینی، شبیه‌سازی شد و نتایج در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷- متوسط ماهانه حجم تقاضا (میلیون متر مکعب) حاصل از اجرای سناریو تغییر الگوی کشت

نوع مصرف	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	جمع
شرب روستایی	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۲/۱۹
شرب شهری	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۶	۲/۲۸
صنعت	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۴۶
کشاورزی	۴/۶۵	۰/۷۳	۰/۱۹	۰	۰/۰۳	۰	۴/۴۸	۱۲/۹۶	۲۲/۱۷	۲۳/۶۶	۲۰/۹۸	۱۰/۸۷	۱۰۰/۷۳
زیست محیطی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

بر اساس نتایج حاصل از اجرای سناریو تغییر الگوی کشت زراعی، مقدار متوسط سالانه حجم تقاضا در دوره پیش‌بینی برای بخش کشاورزی برابر با ۱۰۰/۷۳ میلیون متر مکعب برآورد شد. مقایسه میزان تقاضای پیش‌بینی شده برای بخش کشاورزی در سناریو تغییر الگوی کشت با سناریو مرجع، نشان از کاهش ۵۲ درصدی میزان تقاضا در سناریو تغییر الگوی کشت دارد.

مقدار ماهانه درصد تامین نیاز برای هر یک از مصارف شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی در طول دوره پیش‌بینی، شبیه‌سازی شد و نتایج در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸- متوسط ماهانه درصد تامین نیاز برای مصارف مختلف در طول دوره پیش‌بینی

نوع مصرف	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	جمع
شرب روستایی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
شرب شهری	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
صنعت	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
کشاورزی	۹۸/۹۴	۹۸/۰۸	۹۴/۱۸	۱۰۰	۳۳/۰۵	۱۰۰	۹۸/۰۸	۹۸/۰۸	۹۸/۰۸	۹۸/۰۸	۹۸/۰۸	۹۸/۰۸	۹۲/۷۳
زیست محیطی	۱۰۰	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۱۰۰	۱۰۰	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۱/۶۷	۹۳/۷۵

به طور کلی، در سناریو تغییر الگوی کشت، از کل نیاز شبیه‌سازی شده برای شرب روستایی، شرب شهری، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی به ترتیب مقدار ۱۰۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۹۲/۷۳ و ۹۳/۷۵ درصد تامین خواهد شد. کل نیاز شرب روستایی، شرب شهری و صنعت از منابع آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود. از کل نیاز کشاورزی، حدود ۱۱ درصد از آن از منابع آب‌های سطحی و مابقی از منابع آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود.

تحت سناریو تغییر الگوی کشت زراعی، تراز مطلق سطح ایستابی در مهر ماه سال آبی ۱۴۰۶-۱۴۰۵ برابر با ۱۸۱۱/۴۴ متر و در مهر ماه سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ برابر با ۱۸۱۹/۳۶ متر و اختلاف آن‌ها برابر با ۷/۹۲- متر است. بدین ترتیب متوسط تغییرات سالانه تراز سطح آب برابر با ۰/۷۹۲- متر بدست می‌آید. مقدار متوسط تغییرات سالانه حجم مخزن آبخوان دهگلان از حاصل ضرب مساحت آبخوان یعنی ۷۷۹/۸ کیلومتر مربع، مقدار آبدهی ویژه یعنی ۰/۰۱۹ و میزان متوسط تغییرات سالانه تراز سطح آب یعنی عدد ۰/۷۹۲- متر بدست می‌آید و برابر با ۱۱/۷۳- میلیون متر مکعب است

مقدار متوسط سالانه تغییرات حجم مخزن در طول دوره پیش‌بینی، در سناریوهای مرجع و تغییر الگوی کشت زراعی به ترتیب برابر با ۲۰/۰۲- و ۱۱/۷۳- میلیون متر مکعب بدست آمد. تاثیر تغییر الگوی کشت زراعی در تغذیه آبخوان مورد مطالعه، از اختلاف قدر مطلق دو عدد ۲۰/۰۲ و ۱۱/۷۳ یعنی عدد ۸/۲۹ میلیون متر مکعب قابل تشخیص است. به عبارت دیگر، در صورت تغییر الگوی کشت زراعی، سالانه به طور متوسط، مقدار ۸/۲۹ میلیون متر مکعب به حجم آبخوان اضافه خواهد شد(شکل ۲).

اجرای تلفیقی سناریوهای افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت

مقدار متوسط سالانه تغییرات حجم مخزن در طول دوره پیش‌بینی، در سناریوهای مرجع، افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی به ترتیب برابر با ۲۰/۰۲-، ۱۰/۶۸- و ۱۱/۷۳- میلیون متر مکعب بدست آمد.

تحت تاثیر توام سناریوهای مدیریتی افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی، به طور متوسط سالانه مقدار ۱۷/۶۳ میلیون متر مکعب به حجم آبخوان اضافه و تحت تاثیر سناریو مرجع مقدار ۲۰/۰۲ میلیون متر مکعب از حجم آبخوان کاسته خواهد شد. تاثیر توام افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی در تغذیه آبخوان مورد مطالعه، از اختلاف قدر مطلق دو عدد ۲۰/۰۲ و ۱۷/۶۳ یعنی عدد ۲/۳۹ میلیون متر مکعب قابل تشخیص است. به عبارت دیگر، در صورت اجرای توام سناریوهای مدیریتی افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی، مقدار متوسط تغییرات سالانه حجم مخزن در طول دوره پیش‌بینی برابر با ۲/۳۹- میلیون متر مکعب خواهد بود. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که با اجرای توام سناریوهای مدیریتی افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی، اگر چه بیلان منفی آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه صفر نخواهد شد، اما مقدار تراز سطح ایستابی در پایان دوره پیش‌بینی به مقدار آن در ابتدای دوره پیش‌بینی نزدیک خواهد شد و این حاکی از احیاء آبخوان مورد مطالعه می‌باشد. علاوه بر موارد فوق، موضع کاهش سطح زیر کشت می‌تواند به عنوان یک سناریو موثر در بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی منطقه، مورد توجه قرار گیرد. لذا با توجه به این که اجرای این سناریو در شرایط اجتماعی فعلی امکان‌پذیر نیست، در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفت.

نتیجه‌گیری

نوسانات تراز سطح ایستابی آبخوان دهگلان تحت سناریوهای مدیریتی مرجع، افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی به مدت ۱۰ سال و از ابتدای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ تا پایان سال آبی ۱۴۰۶-۱۴۰۵ پیش‌بینی شد. طی دوره ۱۰ ساله پیش‌بینی، متوسط سالانه تغییرات تراز سطح ایستابی تحت سناریوهای مدیریتی مرجع، افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی به ترتیب برابر با ۱/۳۵۱-، ۰/۷۲۱- و ۰/۷۹۲- متر بدست آمد. نتایج مذکور نشان می‌دهند که تغییرات مدیریت تقاضا به صورت افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی باعث کاهش شدت افت سالانه تراز سطح ایستابی آبخوان دهگلان به ترتیب به مقدار ۰/۶۳ و ۰/۵۶ متر می‌شوند. ذکر این نکته ضروری است که تحت سناریوهای افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت زراعی در دوره آتی، نوسانات تراز سطح ایستابی در طول سال (در طول دوره‌های تنش خشک و تر) روند طبیعی خود را طی کرده و بر اساس نوع تنش خشک یا تر، تغییر محسوسی پیدا نکرده است. این موضوع با یافته‌های تحقیق انجام شده توسط مهدوی و همکاران (۱۳۹۲) همسو می‌باشد. به طوری که بر اساس نتایج حاصل از تحقیق مهدوی و همکاران (۱۳۹۲) اصلاح الگوی کشت باعث کاهش مصرف آب به مقدار ۱۸/۲۰ میلیون متر مکعب و با ثابت بودن سایر عوامل موجب مثبت شدن بیلان آبخوان در سال‌های آتی می‌شود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که با تغییر شیوه آبیاری اراضی باغی به قطره‌ای با راندمان ۹۰ درصد و شیوه آبیاری اراضی زراعی به آبیاری بارانی با راندمان ۷۰ درصد، مقدار ۱۴۱/۹۶ میلیون متر مکعب در سال صرفه‌جویی خواهد شد.

نکته قابل تامل در مورد سناریو افزایش راندمان آبیاری این است که در واقعیت، افزایش راندمان آبیاری با افزایش سطح زیر کشت همراه است، چرا که کشاورز می‌خواهد از همه آبی که در اختیار دارد استفاده کند و همزمان با توسعه روش‌های نوین آبیاری، همان میزان آبی که باید صرفه‌جویی شود را صرف آبیاری سطح بیشتری از مزارع می‌کند. در این حالت برداشت آب ثابت می‌ماند، ولی با افزایش راندمان آبیاری، آب برگشتی به منابع آب‌های زیرزمینی کمتر خواهد شد که باعث بدتر شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی خواهد شد. بنابراین می‌توان گفت که تحت مدیریت غیریکپارچه و غیرمشارکتی آب، افزایش راندمان آبیاری نه تنها به نفع منابع آب نیست بلکه زیان بخش نیز می‌باشد. در این تحقیق فرض بر این قرار گرفته است که افزایش راندمان آبیاری با افزایش سطح زیر کشت همراه نیست و مازاد آب از کشاورزان خریداری می‌شود.

در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی در حالت اتصال پویا مشخص شد که پارامترهای گسترده‌ای مانند پارامترهای محیطی (دما، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق)، شرایط هیدرولیکی رودخانه، فاکتور رواناب، ضریب نگه‌داشت آب خاک، هدایت هیدرولیکی منطقه غیراشباع، ضرایب هیدرودینامیک آبخوان شامل هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، میزان تغذیه از سطح آبخوان، تراز سطح آب در رودخانه و آبخوان و غیره، در تعیین اثر برهم‌کنش آب سطحی و زیرزمینی دخالت دارند. نتایج نشان داد از بین همه

آن‌ها، ضریب قابلیت انتقال بستر رودخانه، مقدار تغذیه از سطح آبخوان و هدایت هیدرولیکی آبخوان بیشترین اثر را داشته و مدل تلفیقی WEAP-MODFLOW نسبت به تغییرات آن‌ها بیشترین حساسیت را دارد. این موضوع با یافته‌های تحقیق انجام شده توسط آذری و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد

سپاسگزاری

این مطالعه در قالب رساله دکتری و با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان انجام شده است که بدین وسیله از دانشگاه کاشان سپاسگزاری بله عمل می آید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع

آذری، آ.، آخوند علی، ع.، رادمنش، ف. و حقیقتی، ع. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی در شرایط بهره‌برداری تلفیقی (مطالعه موردی: دشت دز). مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۸(۲): ۴۷-۳۳.

صفوی، ح.، علیزاده، م. و گل محمدی، م. ۱۴۰۱. بررسی اثرات سناریوهای مدیریتی در برابر تغییرات اقلیمی بر اندرکنش رودخانه و آبخوان، مطالعه موردی: زیرحوضه لنجانات. نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب. ۷(۳): ۲۷-۱۶.

مهدوی، ۱۳۸۴. هیدرولوژی کاربردی، جلد اول، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران. ۳۴۲ صفحه.

ناصرآبادی فواد، قضاوی رضا، ذاکری نیا مهدی. ۱۴۰۴. ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی بر وضعیت کمی آب‌های زیرزمینی آبخوان دهگلان با استفاده از مدل MODFLOW پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز ۱۶ (۱) :۱۳-۱.

Abbas, S.A., Xuan, Y. and Bailey, R.T. 2022. Assessing Climate Change Impact on Water Resources in Water Demand Scenarios Using SWAT-MODFLOW-WEAP. Journal of Hydrology. 9 (10): 1-24.

Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S. and Yang, H. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. Water Resources Research. 45(10):1-16.

Allan, J.A. 2003. Integrated water resources management is more a political than a technical challenge. Developments in Water Science. 50(1):9-23.

Azizi, H., Ebrahimi, H., Samani, H.M.V. and Khaki, V. 2021. Evaluating the effects of climate change on groundwater level in the varamin plain. Water Supply. 21(3):1372-1384.

Biswas, A.K. 2004. Integrated water resources management: a reassessment: a water forum contribution. Water international. 29(2):248-256.

Cohen, B. 2006. Urbanization in developing countries: Current trends, future projections, and key challenges for sustainability. Technology in society. 28(1-2):63-80.

Ficklin, D.L., Luo, Y., Luedeling, E. and Zhang, M. 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. Journal of Hydrology. 374(1–2):16-29

He, X. 2016. Legal methods of mainstreaming climate change adaptation in Chinese water management. Springer.

Hellström, D., Jeppsson, U. and Kärrman, E. 2000. A framework for systems analysis of sustainable urban water management. Environmental impact assessment review. 20(3):311-321.

Howe, C. and Mitchell, C. 2011. Water sensitive cities. IWA Publishing. Hydrogeochemistry. Journal of Hydrology. 63(1-2):131-176.

Mackay, R. and Last, E. 2010. SWITCH city water balance: a scoping model for integrated urban water management. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 9(4):291-296.

Mirani Moghadam, H., Karami, G.H., Bagheri, R. and Barati, R. 2021. Death time estimation of water heritages in Gonabad plain Iran. Environmental Earth Sciences. 80(4):1-10.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I- A discussion of principles. Journal of Hydrology. 10 (3): 282-290.

Sheikha- BagemGhaleh, S., Babazadeh, H., Rezaie, H., Sarai-Tabrizi M. 2023. The effect of climate change on surface and groundwater resources using WEAP-MODFLOW models. Applied Water Science. 13:121.

Toews, M.W. and Allen, D.M. 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):1-19.

Van der Steen, P. and Howe, C. 2009. Managing water in the city of the future; strategic planning and science. Reviews in Environmental Science and Biotechnology. 8(2):115-120.

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. and Huber-Lee, A., 2005. WEAP21-a demand, priority, and preference driven water planning model, part 1: model characteristics. International ater Resources Association, water International, 4: 487-500

Yevjevich, V. 1995. Effect of area time horizons in comprehensive and integrated water resources management. Water Science and Technology. 31(8):19-25.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 19, Feb.-Mar. 2026, p. 981-993

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، بهمن - اسفند ۱۴۰۴، ص. ۹۹۳-۹۸۱

Assessment of the Impact of Water Supply Management Programs on Water Balance Using WEAP and MODFLOW Models

F. Naserabadi[1], R. Ghazavi[2*], M. Zakerinia[3]
Recived: Aug.05, 2025 Accepted: Sep.23, 2025

Abstract:

Population growth, urban expansion, and the development of agricultural and industrial sectors have significantly increased the demand for freshwater. Due to climate change and the rising need for water, the exploitation of groundwater resources—particularly in arid regions—has sharply intensified, leading to a decline in water table levels and reduced groundwater reserves. The aim of this study is to evaluate the quantitative effects of water demand management programs—including improving irrigation efficiency and changing cropping patterns—on the Dehgolan aquifer, the largest aquifer in Kurdistan Province. For this purpose, three-dimensional groundwater flow modeling was performed using the MODFLOW model, while surface water modeling was conducted using the WEAP model. Demand and supply values were then estimated for various sectors including rural and urban domestic use, industry, agriculture, and environmental needs. Finally, the monthly fluctuations in the groundwater table during the prediction period were assessed under three scenarios: baseline, improved irrigation efficiency, and changes in cropping patterns, by integrating the WEAP and MODFLOW models.The results from the coupled WEAP-MODFLOW model showed that the average annual change in the storage volume of the Sang-e-Siah Dam reservoir during the prediction period under the baseline, improved irrigation efficiency, and cropping pattern change scenarios were -20.02, -10.68, and -11.73 million cubic meters, respectively. Under the combined management scenario (improving irrigation efficiency and altering cropping patterns), the average annual recharge to the aquifer is estimated to increase by 17.63 million cubic meters .Although implementing this combined management scenario will not fully eliminate the negative groundwater balance of the studied aquifer, it will bring the water table level at the end of the prediction period closer to that at the beginning of the period. Therefore, this management approach has the potential to contribute significantly to the aquifer's recovery.

Keywords: Management Scenarios, Surface Water Modeling, Water budget, Water Table Level

1- P.h.D student. Nature Engineering Department, University of Kashan, Kashann, Iran
2- Professor, Nature Engineering Department, University of Kashan, Kashann, Iran
3- Associate Professor, Soil and Water Resources Engineering Department, Gorgan University, Gorgan
(*- Corresponding Author Email: ghazavi@kashanu.ac.ir)