نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۷، خرداد - تیر ۱۴۰۲، ص. ۲۳۶-۲۲۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 17, Jun.-Jul. 2023, p. 221-236

مقاله علمی-پژوهشی

مطالعه آبخوان بابل-آمل و ارائه سناریوهای مدیریتی آتی با هدف پایداری کمی و کیفی آبخوان

مجتبی خوش‌روش[۱*]، مسعود پورغلام آمیجی[۲]، مرتضی موگویی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

چکیده

افزایش جمعیت، صنعتی‌شدن و به‌دنبال آن‌ها تغییر اقلیم، فشار زیادی بر منابع آب وارد کرده است. با توجه به محدودیت آب فعلی و همچنین کم-بارشی و خشک‌سالی سال‌های اخیر، امنیت غذایی و تولید محصولات کشاورزی وارد مرحله خطر جدی شده است. این مهم صحیح است که باید برای استفاده از محصولات آب‌بر به واردات و تجارت آب مجازی روی آورد اما حتی‌الامکان باید از منابع موجود (آب و زمین) به نحو مطلوب استفاده و تولید پایدار را حاصل کرد. منابع آب زیرزمینی و مدیریت صحیح و بهره‌برداری بهینه از آن، یکی از راهکارهایی است که ضمن توجه به پایداری آبخوان‌ها، می‌تواند امنیت آبی و غذایی را برای کشور به ارمغان آورد. این بررسی‌های علمی نیاز به ابزارهای گوناگونی دارد که یکی از آن‌ها مدل‌های ریاضی است. امروزه نقش مدل‌های ریاضی در بررسی وضعیت منابع آب پررنگ‌تر از سایر روش‌ها است. بنابراین ساخت مدل ریاضی سفره آب زیرزمینی و اعمال سناریوهای مدیریتی روی آن می‌تواند تا حد زیادی یک دید بهتر از شرایط آتی آن سفره جهت مدیریت بهتر در اختیار قرار دهد. این پژوهش با هدف ساخت مدل مفهومی آبخوان دشت بابل-آمل و بررسی بیلان آب، اضافه برداشت، میزان ورود و خروج آب محدوده مورد نظر و اقدامات مدیریتی جهت پایداری وضع فعلی و آینده بر اساس داده‌های سال ۱۴۰۰-۱۳۶۴ انجام شد. نتایج بررسی‌های بیلان آب آبخوان آبرفتی بابل-آمل در دوره مورد مطالعه و آخرین اطلاعات آماری نشان می‌دهد که حجم تغذیه این آبخوان برابر ۳۱۲/۰۱ و حجم تخلیه آن ۳۱۳/۴۱ میلیون مترمکعب بوده که نمایانگر کسری حجم مخزن آبخوان به میزان ۱/۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. لذا نتایج نشان داد که بیلان سفره آب زیرزمینی آبخوان بابل-آمل و به‌تبع آن سطح آب زیرزمینی آن در حالت تعادل نسبی است اما در سال‌های اخیر به دلیل افزایش سطح زیر کشت برنج در دو فصل زراعی از یک‌سو باعث پایین رفتن سطح آب آبخوان در فصل تابستان شده و از سوی دیگر میزان استفاده از کود و سموم برای مزارع برنج بسیار بیشتر شده است. سپس این مواد از مزارع برنج زهکشی شده و به لایه‌های پایین‌تر نفوذ می‌کند و در فصل‌های پر بارش با بالا آمدن سطح آب آبخوان باعث آلودگی سفره آب زیرزمینی می‌شود. همچنین در فصول پرباران، به دلیل آبشویی بیشتر، آلودگی‌های بیشتری وارد آبخوان شده و باعث انباشت مواد آلاینده در آبخوان و درنتیجه آلوده‌تر شدن آن می‌شود. جهت جلوگیری از بحرانی شدن این مشکلات، این آبخوان نیاز به مدیریت راهبردی داشته تا هم تعادل آبخوان حفظ گردد و هم از لحاظ کیفی دچار آلودگی نشود که در این خصوص، زهکشی چاه در مزارع برنج به‌عنوان یک راه‌حل کاربردی برای بررسی بیشتر توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اندرکش آب سطحی و زیرزمینی، بیلان آب، تغذیه و تخلیه، بحران آب، مدل‌سازی آبخوان.

مقدمه [۱ ۲ ۳]

با توجه به محدودیت منابع آب و خاک و همچنین ناهمگونی و کم‌بارشی و خشک‌سالی‌های اخیر، تأمین امنیت غذایی برای جمعیت رو به رشد جهان به‌خوبی حس شده است. در این میان، منابع آب زیرزمینی نقش بسزایی در تأمین امنیت آب و غذایی جوامع دارد و شعار روز جهانی آب در سال ۲۰۲۲ میلادی (آب زیرزمینی؛ مرئی-کردن نامرئی‌ها) نیز به اهمیت این منابع ارزشمند اشاره داشته است. مطالعات مختلفی وجود دارد که خطرات ناشی از کمبود آب و آسیب‌پذیری منابع آب را در مقیاس منطقه‌ای و جهانی مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به این‌که در دهه‌های اخیر، افزایش جمعیت رشد قابل‌توجهی داشته و در پی آن نیاز به تولید مواد غذایی و گیاهی بیشتر شده است، لذا موجب استفاده بیشتر و گسترده‌تر انسان از منابع طبیعی به‌خصوص منابع آبی گردیده است (Cosgrove & Rijsberman, 2014; Vaghefi et al., 2019; Ahangari

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
(* نویسنده مسئول: Khoshravesh_m24@yahoo.com)
۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

Hassas et al., 2022). اما عدم انطباق بین تأمین و تقاضای آب، می‌تواند بحران‌آفرین باشد و در بعد محلی، منطقه‌ای، ملی و حتی در بعد بین‌المللی اتفاق افتد. عدم تعادل در بخش منابع آب می‌تواند ناشی از چرخه هیدرولوژی و محدودیت طبیعی منابع آب و نیز فعالیت‌های بشری نظیر استفاده بی‌رویه، آلوده کردن منابع آب و عدم توجه به رابطه و اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی باشد (Pourgholam-Amiji et al., 2021b; Bakas et al., 2020; Ahmed et al., 2021).

به دلیل افزایش نیاز روزانه انسان به غذا، کشاورزی باید از نظر تولید با منابع آب موجود توسعه یابد. در این راستا کشت آبی به توجه بیشتری نیاز دارد، زیرا میزان تولید بیشتر در واحد سطح با کشت آبی به دست می‌آید اما منابع آب جدید برای چنین توسعه‌ای محدود است. به دلیل محدودیت منابع آب، تأکید بسیار زیادی بر استفاده موثرتر از منابع آب ارزشمند و غیرقابل جبران زیرزمینی می‌باشد تا با کمترین فشار وارده، هرکدام از این بخش‌ها به بالاترین بهره‌وری دست یابند (Worch, 2021; Ghazi et al., 2021; Aslam et al., 2022; Rovida & Zafferri, 2022). لذا برای داشتن یک کشاورزی موفق، صنعت کارا و بخش شرب و محیط‌زیست بدون دغدغه به دریافت حقابه‌های طبیعی خود، لازم است که با به‌کارگیری روش‌های نوین و پایدار، از منابع موجود به نحو مطلوب استفاده کرد تا بتوان سال‌های متمادی از آبخوان‌ها بهره برد (Emadodin et al., 2019; Ladi et al., 2021; Pourgholam-Amiji et al., 2021a; Pawels & Tom, 2022). بنابراین یکی از تنگناهای اساسی که دنیا به‌خصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک با آن مواجه هستند، کافی نبودن آب برای مصارف متفاوت، اعم از شرب، صنعت، کشاورزی و نیاز محیط‌های طبیعی-زیست‌محیطی است. فراموش کردن این حقیقت، استفاده‌ی نادرست و بدون برنامه از منابع آب موجود یکی از مهم‌ترین عوامل بازدارنده‌ی توسعه‌ی پایدار است و این مسئله با افزایش جمعیت و وقوع ناهنجاری‌های اقلیمی نظیر خشک‌سالی و تغییر اقلیم حادتر می‌گردد. نظر به موقعیت جغرافیایی کشور ایران در کره‌ی زمین که از شرایط آب و هوایی از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب گشته و میانگین بارندگی سالانه آن به‌مراتب از متوسط بارندگی کره زمین کمتر می‌باشد، مدیریت صحیح منابع آبی به‌ویژه آب‌های زیرزمینی ضروری است (Panahi et al., 2020; Sorkhabi, 2021; Viswanathan et al., 2022).

در پژوهشی آلکامو و همکاران بیان کردند که بر اساس نسبت بحرانی شدن، یعنی میزان تخلیه به میزان دسترسی به آب، ایران دارای نسبت بحرانی شدن بیشتر از ۰/۸ بوده و در سال ۲۰۲۵ در گروه کشورهای دچار تنش آبی شدید قرار خواهد گرفت (Alcamo et al., 2017). منابع مطالعاتی مختلف، تنش آبی را به‌صورت استفاده انسان از منابع آب تجدیدپذیر پس از کسر نیازهای زیست‌محیطی از کل منابع آب تعریف کرده و ایران را در زمره کشورهای دارای تنش آبی زیاد قرار دادند. ایران با مصرف ۳۳/۳ کیلومترمکعب در سال آب زیرزمینی برای تولید محصولات غذایی ۱۵/۴ درصد از افت سفره‌های زیرزمینی در جهان را به خود اختصاص داده است که این مقدار ایران را در رتبه دوم و پس از هند قرار داده است (Dalin et al., 2017). افضلی و شاهدی (۱۳۹۳) نیز بیان کردند که در سال‌های اخیر پدیده خشک‌سالی باعث کاهش شدید آب‌های سطحی در کشور شده و استفاده از آب‌های زیرزمینی افزایش یافته است. این امر علاوه بر افت شدید سطح آب در سفره‌های زیرزمینی، موجب تغییر کیفیت منابع آب زیرزمینی را فراهم نموده است. در همین باره، ناصری و همکاران (۱۳۹۶) حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی را با رویکرد تفکیک مؤلفه‌های بیلان آب در چرخه هیدرولوژی بر مبنای داده‌های بلندمدت پنجاه ساله و کوتاه‌مدت هفت ساله بارش در سطح کشور برآورد کردند. نتایج نشان داد که سهم مصرف آب در بخش کشاورزی از ۲۳ تا ۸۰ درصد از منابع آب سطحی و از ۲۲ تا ۷۰ درصد از منابع آب زیرزمینی متغیر است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بر مبنای برازش داده‌های بلندمدت، حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی در مقایسه با حجم آب تجدیدپذیر برابر ۵۰ درصد است.

در کنار خشک‌سالی‌های اخیر، برداشت بی‌رویه از منابع آب، بهره‌برداران را با کاهش سهم برداشت از منابع آب سطحی، افت پیوسته سطح آب زیرزمینی و کاهش کیفیت آن مواجه کرده است. پژوهش میرزایی و همکاران اولین مطالعه هم‌بست آب زیرزمینی-انرژی-غذا در استان‌های ایران (پیامدهای محتمل برای امنیت آبی) را ارائه می‌کند. بنابر نتایج به دست آمده، ۲۱ استان برای تأمین نیاز آبی خود عمدتاً از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌کنند که این در استان مازندران برابر با ۶۲ درصد است. متوسط سالانه تغییر سطح آب زیرزمینی و افت آن تا ۴۶ سانتی‌متر می‌رسد. از منظر اقتصادی، بهای ناچیز آب در کنار پایین بودن قیمت انرژی، عملاً افزایش بهره‌وری آب زیرزمینی و انرژی را توجیه‌ناپذیر می‌کند. در سایه تهدید ورشکستگی آبی کشور، توانمندسازی کشاورزان جهت افزایش بهره‌وری مصرف آب و انرژی برای تولید غذا و بهبود نظارت و مدیریت منابع آب زیرزمینی برای کاهش افت گسترده سطح آب زیرزمینی در استان‌های کشور کاملاً ضروری است (Mirzaei et al., 2019).

فاتحی مرج و همکاران (۱۳۹۰) به پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی آبخوان گربایگان برای دوره زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۴۳۷ با استفاده از مدل عددی MODFLOW پرداختند. این پژوهش با هدف ارائه شیوه‌ای صحیح در مدیریت منابع آب زیرزمینی آبخوان گربایگان استان فارس به عنوان منطقه‌ای با اهمیت استراتژیک از نظر کشاورزی انجام شد. نتایج حاکی از آن است که شیب افت هیدروگراف واحد آبخوان برای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سال آینده، به ترتیب به

میزان ۰/۳۳۱، ۰/۲۹۸ و ۰/۲۷ متر بر سال بوده و می‌توان دریافت که با افزایش دوره پیش‌بینی، شیب افت کاهش می‌یابد که نشان از افت قابل‌توجه سطح ایستابی با گذشت زمان می‌باشد. همچنین ایشان بر قابلیت بالای مدل عددی MODFLOW در پیش‌بینی‌های انجام‌شده، تأکید کردند. در مطالعات مختلف نیز توانایی مدل MODFLOWدر شرایط مختلف ژئولوژیکی و هیدروشیمیایی نیز بررسی شد. به عنوان مثال، این مدل برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی (Karaya & Hajnala, 2015) و پیشروی آب شور به آبخوان به کار گرفته شد (Priyanka & Mahesha, 2015). همچنین جامعیت مدل MODFLOW در شبیه‌سازی آب زیرزمینی، باعث افزایش کاربری آن در سایر بخش‌های مرتبط نیز شد. امروزه این مدل برای بررسی اندرکنش آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی، با مدل‌های ریاضی مختلف جفت می‌گردد (Kim et al., 2008; Yang et al., 2022).

قبادیان و همکاران (۱۳۹۵)، اعمال سناریوی مدیریتی در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی را با مدل مفهومی و ریاضی MODFLOW در دشت خزل-نهاوند بررسی کردند. ابتدا مدل کمی آبخوان دشت یادشده با کد MODFLOW در بستهٔ نرم‌افزار GMS تهیه و در دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار واسنجی و سپس صحت‌سنجی شد. در نهایت نوسانات سطح آب برای ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده با شرایط کنونی و با اعمال سناریوی مدیریتی کاهش ۱۰ درصدی پمپاژ چاه‌ها، پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که بیشترین افت سطح آب زیرزمینی در نواحی شمال شرق دشت رخ داده و مقدار آن به‌ترتیب ۱/۸۲، ۳/۶ و ۸/۲ متر برای ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده به دست آمد. درحالی که با اعمال سناریوی یادشده این مقادیر برابر ۰/۵۲، ۲/۷ و ۷/۰۷ متر خواهند بود.

یاری و درزی نفت‌چالی (۱۳۹۶) به پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف مدیریتی با استفاده از مدل MODFLOW پرداختند. در این تحقیق، کارایی مدل سه‌بعدی و تفاضل محدود MODFLOW برای شبیه‌سازی سطح ایستابی آبخوان قم با استفاده از داده‌های یک دوره دوساله ارزیابی شد. مدل به‌ترتیب به پارامترهای آبدهی ویژه، هدایت هیدرولیکی، تغذیه و تخلیه، بیشترین حساسیت را نشان داد. ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله واسنجی، به ترتیب بین ۰/۲۴ تا ۰/۹۹ و ۰/۰۱ تا ۰/۱۴ متر متغیر بود. تغییرات ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب بین ۰/۵۲ تا ۰/۹۷ و ۰/۰۰۲ تا ۱/۱۴ بود. بر اساس نتایج مدل، بهترین سناریو برای تعادل بخشی و احیاء آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی با استفاده از پساب تا افق ۱۴۰۰ می‌باشد. خوش‌روش و نیکزاد طهرانی (۱۳۹۷)، سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب دشت تالار با استفاده از مدل‌سازی آب زیرزمینی و سیستم‌های یکپارچه منابع آب را ارزیابی کردند. در این پژوهش از مدل شبیه‌سازی در حوضه آبریز رودخانه تالار، واقع در استان مازندران استفاده شد. آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی شد. نتایج واسنجی مدل MODFLOW نشان داد که انطباق خوبی بین سطح ایستابی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده وجود دارد؛ به‌طوری‌که میزان RMSEبرای جریان‌های ماندگار و غیر ماندگار به ترتیب ۰/۳۳۶ و ۰/۴۹ به دست آمد. ملک‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) نیز به پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW در منطقه کبودر آهنگ واقع در استان همدان پرداختند. تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی نشان داد که مدل‌های عددی، تراز آب زیرزمینی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کنند. به‌عنوان مثال مقادیر ضریب همبستگی و ضریب نش برای مدل MODFLOW به ترتیب مساوی ۰/۹۱۷ و ۰/۷۲۷ به‌دست آمد.

لاله‌زاری و کراچیان (۱۳۹۷) به مدل‌سازی کمی و کیفی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW در آبخوان شهرکرد پرداختند. در مطالعه ایشان، آبخوان شهرکرد با استفاده از داده‌های ماهانه بار هیدرولیکی پیزومترها، حجم تخلیه چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات و میزان بارندگی و آب برگشتی مدل‌سازی شد. نتایج حاکی از آن بود که تراز سطح ایستابی پیش‌بینی‌شده در فرایند واسنجی در مقایسه با مقادیر واقعی ارتفاع آب در پیزومترها با واریانس خطای ۰/۶۳، نتایج به‌دست‌آمده از مدل را برای پیشگویی رفتار جریان تایید می‌کند. زینعلی و همکاران (۱۳۹۷) نیز به بررسی عملکرد مدل مفهومی MODFLOW و فرامدل شبیه‌ساز برنامه‌ریزی ژنتیک در مدل‌سازی هیدروگراف معرف آبخوان دشت لور-اندیمشک پرداختند. با استفاده از مدل مفهومی آب زیرزمینی MODFLOW و فرامدل شبیه‌ساز برنامه‌ریزی ژنتیک، هیدروگراف معرف آبخوان مدل‌سازی و نتایج با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل مفهومی MODFLOW با ضریب تبیین ۰/۷۸ در مرحله آموزش نسبت به فرامدل شبیه‌ساز برنامه‌ریزی ژنتیک با ضریب تبیین ۰/۶۳ دارای عملکرد بهتری می‌باشد. مقامی مقیم و تقی‌پور (۱۳۹۸) به بررسی عوامل مؤثر در تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی دشت صفی‌آباد شهرستان اسفراین پرداختند. عواملی چون خشک‌سالی، افزایش جمعیت، تبدیل‌شدن صفی‌آباد از روستا به شهر، بازدارنده نبودن جریمه‌های مربوط به تخلفات اضافه برداشت و مسائل فرهنگی، سبب افزایش برداشت و در نتیجه تغییرات منفی و عواملی چون استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری، تغییر نوع کشت و استفاده از کنتورهای هوشمند، سبب تغییرات مثبت در سطح آب‌های زیرزمینی شده و شیب کاهش سطح آب در این دشت را تعدیل کرده است.

احمدی بادجانی و همکاران (۱۳۹۹) به شبیه‌سازی عددی جهت ارایه رابطه‌ای برای برداشت بهینه آب زیرزمینی آبخوان دامنه در استان اصفهان با استفاده از مدل MODFLOW پرداختند. نتایج

تحلیل مدل عددی مبین این است که اگر با وضعیت فعلی از آبخوان بهره‌برداری شود، افت شدید آب در آبخوان و خشک شدن تدریجی آبخوان در آینده ادامه پیدا خواهد کرد. البته کاهش دبی پمپاژ باعث بهبود نسبی این وضعیت می‌شود. همچنین جمالی‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) به پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های سری زمانی و GMS در دشت رفسنجان پرداختند. نتایج شبیه‌سازی افت آب زیرزمینی نیز نشان داد در تمامی منطقه افت سطح آب زیرزمینی در دوره آتی نسبت به دوره پایه رخ داده و بیشترین میزان افت آب زیرزمینی در بخش‌های جنوب غرب دشت صورت گرفته است و سالیانه حدود ۱۳۰ میلیون مترمکعب اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی صورت می‌گیرد. در حالت کلی، آب زیرزمینی در ابتدای دوره بیشترین مقدار (سطح بالا) و در اواخر دورهٔ آماری، کمترین مقدار (پایین‌ترین سطح) را داشته است. با توجه به نرخ رشد جمعیت و چالش‌های خشک‌سالی در حال و آینده و رقابت سایر بخش‌ها برای منابع آب، استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر و جلوگیری از مصرف بیش از حد منابع آب زیرزمینی تجدیدناپذیر، از راهکارهای مؤثر در جهت پایداری توسعه در بخش کشاورزی می‌باشد. بنابراین ضرورت استفاده بهینه از منابع آب قابل استحصال و افزایش کارایی مصرف آب امری اجتناب‌ناپذیر است.

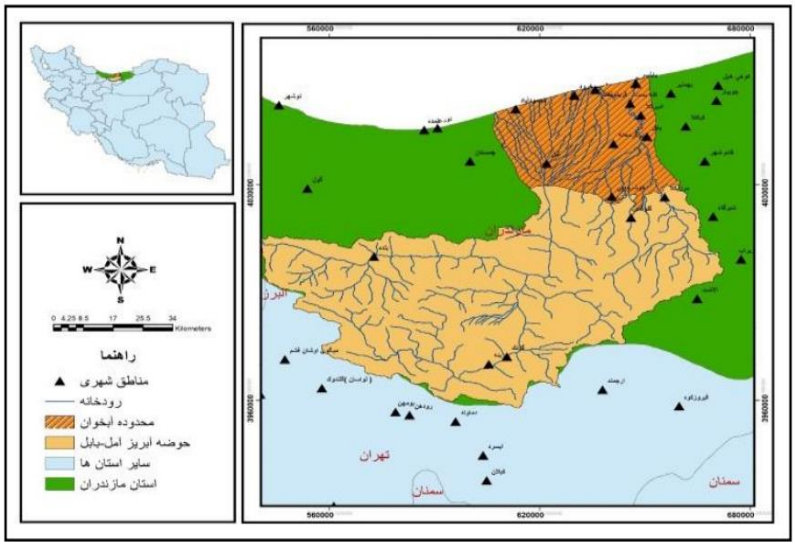
با توجه به مطالب بیان‌شده و همچنین مصرف بی‌رویه و کنترل-نشده منابع آب سطحی و زیرزمینی، کاهش نزولات جوی، تمرکز مصرف در برخی نقاط (عدم تعادل بین تقاضا و پتانسیل تأمین آب)، الگوی نامناسب کشت و عدم آبیاری صحیح، حفر چاه‌های متعدد و بهره‌برداری بی‌برنامه از آن‌ها در چند دهه گذشته، باعث ایجاد بحران در وضعیت منابع آب زیرزمینی در اکثر دشت‌های کشور شده است. وضعیتی که در آن سطح آب زیرزمینی به‌طور مداوم سیر کاهشی داشته است؛ به‌طوری‌که در برخی نقاط میزان کاهش متوسط سالانه آن در طول ۱۰ سال گذشته در حد چند متر بوده است. یکی دیگر از مشکلات منابع آب، آلودگی آب است به‌گونه‌ای که در برخی مناطق با توجه به بالا بودن سطح ایستابی در سفره آب زیرزمینی این ناحیه‌ها با مشکل آلوده‌شدن به‌واسطه آلاینده‌های سطحی از جمله کود و سموم کشاورزی مواجه هستند. بنابراین این پژوهش با هدف مطالعه آبخوان دشت بابل-آمل و بررسی بیلان آب، اضافه برداشت، میزان ورود و خروج آب محدوده مورد نظر و اقدامات مدیریتی جهت پایداری وضع فعلی و آینده می‌باشد. همچنین پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی محدوده آبخوان بابل-آمل نیز با استفاده از مدل GMS و نرم‌افزار MODFLOW انجام شد که تاکنون چنین مطالعه‌ای در منطقه مورد نظر انجام نشده است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، آبخوان بابل-آمل واقع در نقاط مرکزی استان مازندران می‌باشد که مطابق اطلاعاتی دریافتی، به‌عنوان بزرگ‌ترین آبخوان و بزرگ‌ترین دشت استان شناخته شده است. در محدوده مطالعاتی آبخوان بابل-آمل، وسعت دشت برابر ۱۴۴۸/۵۷ کیلومتر مربع، حجم بارندگی در سطح دشت برابر ۱۰۹۳/۰۵ تبخیر و تعرق واقعی برابر ۷۹۰/۴۱ و بارندگی مفید شامل جریان سطحی با ۲۰۴/۲۷ و نفوذ با مقدار ۹۸/۳۷ است که همگی بر حسب میلیون مترمکعب در سال می‌باشند. همچنین وسعت محدوده بیلان برابر ۱۴۰۵/۵ کیلومتر مربع است. از دیگر خصوصیات آبخوان بابل-آمل می‌توان به تعداد ۶۱۲۳۹ چاه بهره‌برداری و ۱۳۱ چشمه به ترتیب با تخلیه سالانه ۲۳۵/۷۳ و ۱۸/۰۸ میلیون مترمکعب در سال اشاره کرد. مهم‌ترین منبع مصرف، چاه‌ها و جریان سطحی و چشمه‌ها هستند که در سه بخش شرب، کشاورزی و صنعت به مصرف می‌رسند. از مجموع چاه‌های موجود در دشت، ارتفاعات و آبخوان آبرفتی در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب ۱۵۲/۵۴ به مصرف شرب، ۳۱۲/۷ به مصرف کشاورزی و ۱۰/۰۹ میلیون مترمکعب در سال به مصرف صنعت می‌رسد. همین روند برای جریان سطحی و چشمه‌ها صادق است و در این بخش، ۳۰/۳۴ به مصرف شرب، ۲۰۱۰/۱۳ به مصرف کشاورزی و ۱/۴۶ میلیون مترمکعب در سال به مصرف صنعت می‌رسد (شرکت آب منطقه ای مازندران، ۱۳۹۸). برای انجام این پژوهش، از داده‌های مربوط به سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۶۴ استفاده شد. شکل (۱)، نقشه محدوده مورد مطالعه آبخوان بابل-آمل را نشان می‌دهد.

بدیهی است که دوبار کشت برنج در سال و استفاده بیش از حد از منابع آب به وسیله چاه‌ها در منطقه مورد مطالعه، باعث افت تراز سطح ایستابی در سال‌های اخیر شده است. فرض اول این است که مدل MODFLOW می‌تواند جریان آب زیرزمینی و به خصوص سطح ایستابی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. فرض دوم نیز این چنین است که عمده مصرف آب در آبخوان بابل-آمل توسط چاه‌های بهره‌برداری رخ می‌دهد و تهیه مدل مفهومی، تحت تاثیر چاه‌ها است. بنابراین با توجه به اهداف پژوهش، اثبات این دو فرض مهم به بسیاری از سوالات نیز پاسخ می دهد. روش انجام پژوهش در این پژوهش به این صورت است که ابتدا داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری‌شده و محدودیت‌های اجرایی و مدل‌سازی برطرف شد. سپس با استفاده از بانک داده معتبر و صحیح، مدل و نرم‌افزارهای مدنظر اجرا شد. سپس بعد از واسنجی و آموزش مدل، نتایج نهایی به دست آمد. در نهایت بعد از تحلیل اولیه نتایج، سناریوهای مدیریتی جهت پیش‌بینی وضعیت آتی ارائه شد. جمع‌آوری و تکمیل داده‌های مورد نیاز به شرح زیر است:



شکل ۱- موقعیت حدفاصل کوه و دشت آبخوان بابل-آمل بر روی عکس هوایی

جمع‌آوری داده و گام‌های اجرایی

مرحله اول، شامل جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های هواشناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی می‌باشد. داده‌های مورد نیاز (به‌صورت Shape File) شامل لایه محدوده آبخوان، لایه سنگ بستر، لایه تراز سطح ایستابی، اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری، اطلاعات چاه‌های مشاهداتی، اطلاعات رودخانه و زهکش‌ها، اطلاعات هیدرودینامیکی آبخوان شامل هدایت هیدرولیکی، ضریب انتقال، تخلخل و آبدهی ویژه، اطلاعات مربوط به تغذیه سطحی (بارندگی، باران مؤثر و نفوذ عمقی) و اطلاعات مربوط به شرایط مرزی آبخوان جمع‌آوری شد. لذا اخذ و به‌کارگیری نتایج مطالعات پایه و مطالعات موجود، مهم‌ترین گام اجرایی پژوهش را تشکیل می‌دهد. سپس مدل عددی و نرم‌افزار مناسب انتخاب شده و مدل مفهومی آبخوان تهیه شد. یکی از چالش‌های اساسی که در شبیه‌سازی جریان سیال به کمک دینامیک سیالات محاسباتی وجود دارد، قابل اعتبار بودن نتایج است که این موضوع به ساختار کلی فرایند شبیه‌سازی بستگی دارد. در واقع صحت‌سنجی مدل ریاضی استفاده‌شده اهمیت بسیار زیادی در مسیر شبیه‌سازی مسئله مورد نظر دارد. در کنار مدل ریاضی، انتخاب درست روش عددی در مسیر حل مسئله، اهمیت بسیار زیادی دارد (Konikow et al., 2006; Zhou et al., 2011).

بعد از این مرحله، شبکه مناسب ایجاد شده و مدل مفهومی به مدل شبکه تبدیل و سایر خواص سلول‌های شبکه تعیین شد. یکی دیگر از مهم‌ترین مراحل انجام کار، اعمال شرایط مرزی و اولیه به مدل می‌باشد. شرایط مرزی به محدودیت‌هایی گفته می‌شود که بر شبکه محل اعمال شده تا اندرکنش بین محدوده شبیه‌سازی و محیط اطراف محل را نشان دهد و به کمک آن، نتیجه تغییرات محیط بر روی محدوده مدل مشاهده می‌شود (Franke et al., 1987; Liu et al., 2009; Zeydalinejad, 2022). انتخاب درست شرط مرزی یک گام حیاتی در طراحی مدل‌ها می‌باشد. وجود خطا در آن می‌تواند باعث ایجاد خطاهای قابل‌توجهی در نتایج شبیه‌سازی شود. انتخاب نوع شرط مرزی بستگی به مدل مفهومی، ویژگی‌های فیزیکی و نوع اطلاعات صحرایی موجود دارد (Franke et al., 1987; Mpouras et al., 2021). شرایط مرزی بسته به موقعیت نشان در محدوده شبیه‌سازی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) شرایط مرزی داخلی که در داخل محدوده محل قرار می‌گیرد (همانند شرط مرزی چاه) و (۲) شرایط مرزی خارجی که در مرز تقسیم و یا لبه محدوده شبیه‌سازی قرار می‌گیرند. مرزهای خارجی خود به دو دسته کلی مرزهای هیدرولیکی و فیزیکی تقسیم می‌شوند. مرزهای فیزیکی آب‌های زیرزمینی در مناطقی که لایه‌های نفوذناپذیر و با پهنه‌های وسیع آب‌های سطحی حضور دارند، به وجود می‌آید. در صورت نبود مرزهای فیزیکی مشخص، مرزها با توجه به شرایط هیدرولیکی موجود در نظر گرفته می‌شوند. مثلاً در صورتی که در یک محل مقادیر بار هیدرولیکی و یا شار جریان از طریق اندازه‌گیری و یا تخمین مشخص باشد، می‌توان آن منطقه را به عنوان یک شرط مرزی هیدرولیکی در نظر گرفت.

سه نوع شرط مرزی هیدرولیکی اصلی بار هیدرولیکی، جریان و جریان وابسته به بار هیدرولیکی در شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی وجود دارد که همه آن‌ها را می‌توان به‌صورت ثابت و یا متغیر با زمان بر مرزها اعمال نمود (Sanford, 2002; Kiraly, 2003). مرزهای هیدرولیکی شامل مرزهای باز محدوده سامانه و مرزهای خطوط جریان می‌باشد. در نهایت اجرای اولیه مدل برای حالت پایدار انجام

شد و واسنجی مدل صورت گرفت. هدف از واسنجی، حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده است و این کار ممکن است به وسیله اندازه‌گیری دقیق پارامترها و یا به‌وسیله روش‌های بهینه‌سازی انجام شود. معمولاً رابطه خاص بین شکل عمومی مدل و سیستم فیزیکی مورد مطالعه از طریق پارامترهای مدل وجود دارد که این رابطه، دقت مقادیر پارامترها را برای خوبی برازش، بین خروجی مدل و خروجی ثبت‌شده تعیین می‌کند. بعد از این مرحله، مدل مورد نظر برای حالت ناپایدار اجرا شده و واسنجی مجدد انجام شد. آنالیز حساسیت و صحت‌سنجی مدل، در تکمیل فرایند واسنجی اعمال شد. هدف از تحلیل حساسیت، توصیف آن است که مقادیر خروجی مدل چقدر تحت تأثیر تغییرات مقادیر ورودی هستند (Saltelli et al., 2008). با استفاده از تحلیل حساسیت، اقدام به این کار شد. سپس ویژگی یا ویژگی‌هایی که ارزش چندانی نداشتند، از مجموعه ورودی‌ها کنار گذاشته شده و مدل‌سازی با استفاده از بقیه پارامترها انجام گرفت. در نهایت بعد از واسنجی (آموزش) مجدد و تحلیل حساسیت، صحت‌سنجی (آزمایش) مدل انجام شده و نتایج آن تحلیل و تفسیر شد. ایجاد سناریوهای مدیریتی، اجرای مجدد و نتیجه‌گیری، مرحله آخر گام‌های اجرایی این پژوهش می‌باشند. در پایان، مقایسه و تحلیل نتایج انجام شده و پیشنهادهایی ارائه شد.

مدل‌های مورد استفاده

مدل‌های آب زیرزمینی اغلب در ارزیابی منابع آبی جهت تعیین دوره طولانی‌مدت بهره‌برداری از آبخوان‌های ناحیه‌ای یا محلی به کار می‌روند. مخصوصاً مدل جریان می‌تواند اطلاعات مفیدی از عوامل هیدرولیکی از قبیل نرخ جریان افت و جهت جریان ارائه دهد. علاوه بر آن شرایط زیرسطحی به‌آسانی قابل‌دسترس و قابل‌مشاهده نبوده و به همین جهت مدل‌ها به‌عنوان ابزاری کاربردی برای درک سیستم‌های آب زیرزمینی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتارشان درآمده‌اند. بسته نرم‌افزاری سیستم مدل‌سازی آب زیرزمینی (GMS[1])، نرم‌افزار پیچیده و جامعی برای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی می‌باشد. این نرم‌افزار در حقیقت واسط گرافیکی و به‌عنوان پیش‌پرداز برای ۱۰ نوع مدل آب زیرزمینی است که عمدتاً به روش عددی تفاضل محدود و اجزای محدود به شبیه‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی می‌پردازد (Owen et al., 1996). این مدل به وسیله آزمایشگاه تحقیقات محیط‌زیست دانشگاه بریگهام یانگ[2] و با مشارکت بخش مهندسی آب ارتش ایالات‌متحده آمریکا[3] توسعه داده شده است.

نرم‌افزار MODFLOW در سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده آمریکا[4] به‌عنوان یک مدل ماژولار جریان تفاضل محدود، توسعه یافته است. این مدل، یک کد کامپیوتری است که معادله جریان آب زیرزمینی را حل می‌کند. این برنامه توسط علم هیدروژئولوژی برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی از طریق سفره‌های آبی تهیه شده است. از آنجا که MODFLOW توسعه اصلی خود را در اوایل دهه ۱۹۸۰ داشته است، سازمان زمین‌شناسی آمریکا چهار نسخه اصلی از آن را منتشر کرد و در حال حاضر این نسخه‌ها عملاً به‌عنوان کد استاندارد برای شبیه‌سازی آبخوان در نظر گرفته شده است. چندین واسط کاربر گرافیکی تجاری و غیرتجاری نیز به‌طور فعال برای MODFLOW توسعه یافته است (McDonald & Harbaugh, 2003; Harbaugh, 2005). شکل (۲)، شماتیکی از نحوه محاسبه بیلان آب و تهیه مدل مفهومی آبخوان را نشان می‌دهد.

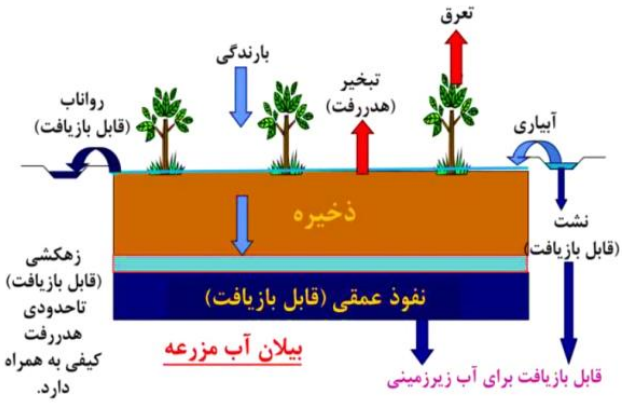
نرم‌افزارهای مورد استفاده

- ✓ استفاده از نرم‌افزار Arc GIS نسخه 10.4.1 برای تهیه نقشه‌های فراوانی و همبستگی متغیرهای مورد مطالعه.
- ✓ استفاده از مدل GMS و نرم‌افزار MODFLOW برای مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی و تراز آبخوان در محدوده مورد مطالعه.
- ✓ استفاده از نرم‌افزار Excel و SPSS به منظور انجام محاسبات معمول که به شرح زیر است:
  - الف) پیش‌پردازش اطلاعات (اعم از مرتب کردن، تکمیل اطلاعات، رسم نمودارها و غیره).
  - ب) مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های مختلف.

مدل‌سازی آب زیرزمینی و واسنجی آن

مدل آب زیرزمینی در مفهوم خاص آن، روابط ریاضی است که سیستم طبیعی آبخوان و عوامل تغذیه و تخلیه آن و تغییرات سطح ایستابی یا سطح پیزومتریک را به‌صورت مکانی و زمانی نشان می‌دهد. با داشتن چنین روابطی می‌توان اثرات پارامترهای مختلف را بر یک سیستم بررسی و نتیجه‌گیری کرد. همچنین مدل‌های آب زیرزمینی بر اساس اطلاعاتی که به مدل داده می‌شود، شرایط طبیعی آبخوان را شبیه‌سازی کرده و با داشتن اطلاعات نقاط شاهد (چاه‌های مشاهده‌ای یا ایستگاه‌های هیدرومتری)، اقدام به برآورد دقیق برخی پارامترهایی که عدم قطعیت آن‌ها زیاد است، می‌نماید. افق زمانی می‌تواند حال، آینده‌ای نزدیک و یا دور باشد که جزء نیازمندی‌های سازمان‌های مرتبط است. این پارامترها می‌تواند تغذیه سطحی از جمله بارش مؤثر و آب برگشتی و همچنین ضریب انتقال آبخوان باشد (Mpouras et al., 2021; Zeydalinejad, 2022).

1- Groundwater Modeling System
2- Brigham Young
3- U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station
4- United States Geological Survey



شکل ۲- شماتیک محاسبه بیلان آب و تهیه مدل مفهومی آبخوان

با واسنجی مدل به‌واسطه اطلاعات دقیق می‌توان پاسخ قابل اطمینانی به سؤالات زیر داد (Konikow et al., 2006):

روند تغییرات سطح آب زیرزمینی با حفظ وضعیت استحصال کنونی در سال‌های آتی چگونه خواهد بود؟

- ✓ حذف تعدادی چاه غیرمجاز مشخص (از نظر موقعیت و وضعیت بهره‌برداری)، چه تأثیری بر تغییرات سطح آب زیرزمینی خواهد داشت؟
- ✓ حفر چاه‌های جدید در چه مناطقی صورت بگیرد تا اثر سوء بر میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی نداشته باشد؟
- ✓ با کاهش چند درصد در میزان آبدهی چاه‌های بهره‌برداری می‌توان تراز سطح آب زیرزمینی را بهبود بخشید؟
- ✓ در نواحی که سطح آب زیرزمینی بالا است، چگونه می‌توان سطح آب زیرزمینی را در یک حد معینی کنترل کرد؟

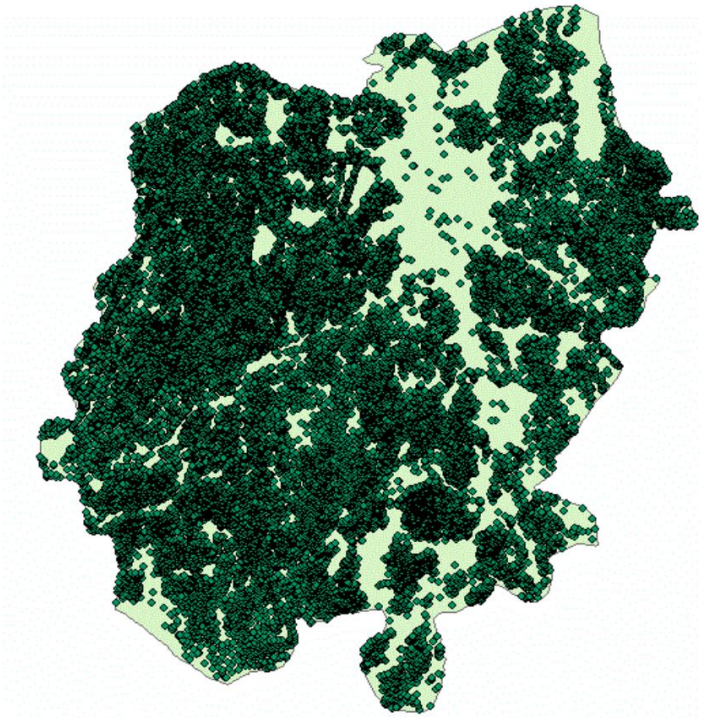
مشکلات اجرائی در انجام طرح و روش حل مشکلات

به دلیل رایج شدن دو بار در سال کشت برنج در استان مازندران و به‌ویژه در محدوده آبخوان بابل-آمل، این موضوع باعث فشار بر آبخوان، برداشت بیش از ظرفیت آبخوان در دشت مذکور و افت زیاد تراز سطح ایستابی شده است. با ادامه این روند، شرایط آبخوان به حالت بحرانی در می‌آید. به همین علت انجام این پژوهش به جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی محدوده آبخوان بابل-آمل در درازمدت مدنظر قرار گرفت. یکی از مشکلات اجرایی، چاه‌های بهره‌برداری غیرمجاز است که اطلاعات آن ثبت نشده و بر روی نتیجه مدل‌سازی تأثیرگذار است که اثر آن را بر بحث کالیبره مدل می‌توان تا حدودی اصلاح کرد. دیگر مشکل اجرایی مربوط به عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان برای محدوده‌های مختلف است که راه‌حل این است که در بحث واسنجی این موارد در نظر گرفته شود.

بنابراین در کنار امکانات و پتانسیل‌های توسعه بهره‌برداری، محدودیت‌های کمی و کیفی نیز وجود دارد که لحاظ کردن آن‌ها در برنامه‌ریزی و اعمال مدیریت بسیار ضروری می‌باشد. در این محدوده، با توجه به تغییرات طولانی‌مدت هیدروگراف معرف آبخوان و نتایج بیلان آب زیرزمینی و بیلان محدوده‌های مطالعاتی، محدودیت بهره‌برداری از لحاظ کمی شامل افت سطح آب زیرزمینی در اراضی مخروط افکنه‌ای سفره آزاد و افت فشار پیزومتری در سفره محبوس می‌باشد. برخی از محدودیت‌ها به ساختار طبیعی منابع آب بستگی دارد که در این صورت با شناخت آن‌ها و اعمال برنامه‌های سازگار با محدودیت‌ها می‌توان اثرات زیان‌بار را تا حدودی کاهش داد.

نتایج و بحث

بهره‌برداری بهینه از منابع آب بخصوص منابع آب زیرزمینی، بدون برنامه‌ریزی و اعمال مدیریت اصولی و فراگیر امکان‌پذیر نمی‌باشد. شناخت همه‌جانبه ویژگی‌های هیدرولوژیک حوزه‌ها، تحلیل مؤلفه‌های چرخه آب و نهایتاً تبیین دقیق امکانات و محدودیت‌های موجود در امر بهره‌برداری منابع آب و تعیین جایگاه نیازها و میزان تقاضا، ابزارهای اساسی برنامه‌ریزی و مدیریت در بخش آب محسوب می‌گردد. در این مبحث ضمن بیان حجم ذخایر موجود، به امکانات و محدودیت‌های توسعه بهره‌برداری و الگوهای بهره‌برداری و الگوهای بهره‌برداری بهینه منابع آب اشاره شده و نهایتاً شیوه‌های حفاظت و تقویت آبخوان ارائه خواهد شد. برای شناخت از وضعیت منطقه مورد مطالعه، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری آبخوان بابل-آمل در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- موقعیت چاه‌های بهره‌برداری آبخوان بابل-آمل بر اساس دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳٦٤

محدودیت‌های بهره‌برداری

آبخوان بابل-آمل یکی از آبخوان‌های بزرگ محدوده مطالعاتی حوضه آبریز درجه ۲ با کدهای ۱۴ و ۱۵ است که حجم ذخایری معادل ۵۲۷۰/۶۳ میلیون مترمکعب را دارد که حجم ذخیره تجدیدشونده آن معادل ۳۱۲/۰۱ میلیون مترمکعب است. در این حوزه آبریز با توجه به تغییرات طولانی‌مدت هیدروگراف معرف آبخوان و نتایج بیلان آب زیرزمینی، محدودیت بهره‌برداری از لحاظ کمی شامل افت سطح آب زیرزمینی در اراضی مخروط افکنه‌ای سفره آزاد و افت فشار پیزومتری در سفره محبوس می‌باشد. برخی از محدودیت‌ها به ساختار طبیعی منابع آب بستگی دارد که در این صورت با شناخت آن‌ها و اعمال برنامه‌های سازگار با محدودیت‌ها می‌توان اثرات زیان‌بار را تا حدود زیادی کاهش داد، برخی از این محدودیت‌ها به شرح زیر می‌باشد:

ماسه‌دهی: در دشت‌های حوزه آبریز (جلگه مازندران) ماسه‌های ریزی که به‌صورت افق‌های نسبتاً ستبر در بین ریگ و نهشته‌های ناپیوسته قرار دارند، حاوی آب بوده و به دلیل ریزدانه بودن (قطر ۲۰ تا۳۰ میکرون) در زمان پمپاژ چاه‌ها به حالت معلق درآمده و به همراه آب تخلیه شده و بعد از مدتی باعث ریزش دیواره چاه و در نتیجه نشست زمین‌های اطراف می‌گردد. ضمن آنکه چاه نیز از ماسه پر شده و غیرقابل استفاده خواهد شد. این پدیده مشکلات زیادی را در امر بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی ایجاد نموده است.

آب شور: وجود لایه‌های حاوی آب شور در بخش زیرین آبخوان آبرفتی حاوی آب شیرین، به‌ویژه در نواحی که جبهه ورودی و تغذیه‌کننده آب شیرین ضعیف است، یک تهدید جدی برای آبخوان به شمار می‌رود. در این نواحی با افزایش بهره‌برداری، مخروط بالاآمده آب شور ایجاد می‌شود که توسعه آن موجب آلودگی سفره آب زیرزمینی حاوی آب شیرین به آب شور می‌گردد. احتمال وقوع این پدیده به‌ویژه در نواحی بین مخروط افکنه‌ها و میان‌دشتی و پایان‌دشتی جلگه ساحلی زیاد است. به علت مجاورت آبخوان آبرفتی حاوی آب شیرین با آبخوان آبرفتی حاوی آب شور در محدوده‌های مطالعاتی بابل-آمل، در صورت بهره‌برداری بی‌رویه از آبخوان آبرفتی می‌تواند باعث ایجاد افت و معکوس شدن گرادیان هیدرولیکی در این آبخوان شده و در نتیجه موجب آلودگی لایه‌های آب‌دار شیرین شود. در محدوده‌های مطالعاتی واقع در غرب حوزه آبریز پدیده هجوم آب شور دریا از محدودیت‌های بهره‌برداری محسوب می‌گردد. به این معنی که افزایش بی‌رویه بهره‌برداری از آب زیرزمینی موجب از بین رفتن تعادل بین آب‌های شیرین آبخوان ساحلی و آب شور دریا شده و نهایتاً هجوم آب شور به آبخوان آبرفتی می‌گردد. پالایش آبخوان از این آلودگی نیاز به سال‌ها وقت و مقادیر زیادی آب شیرین دارد. شاخه‌های شورکننده رودخانه‌ها نیز یکی دیگر از عوامل محدودیت در بهره‌برداری از منابع آب هستند. این مورد در حوزه آبریز به‌طور مشخص در رودخانه گرم‌رود از سرشاخه‌های بابل‌رود مشاهده می‌شود.

چشمه معدنی لاله‌زار با آبدهی قابل‌توجه و کیفیت بسیار نامطلوب موجب آلوده‌شدن این رودخانه شده است؛ به‌نحوی‌که آب آن قبل از الحاق نهر کاری (شق‌نهر از رودخانه هراز) عملاً غیرقابل استفاده است. اختلاط آب چشمه‌های معدنی با آب رودخانه رمک واقع در شرق سادات‌محله رامسر نیز موجب نا مطلوب‌شدن کیفیت آب این رودخانه شده و هدایت الکتریکی آب رودخانه در مقطع ورودی به دشت به حدود ۲۰ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر می‌رسد.

نشست زمین: نشست زمین عموماً در مناطقی که تناوبی از لایه‌های شن و ماسه‌ای با لایه‌های رس و سیلتی وجود دارد و میزان افت سطح آب زیرزمینی به‌ویژه در لایه‌های محبوس شده بیشتر است اتفاق می‌افتد. با توجه به وجود لایه‌های آبدار محبوس و حضور لایه‌های رسی و سیلتی در دشت‌های ساحلی حوزه آبریز می‌تواند پدیده نشست زمین در اراضی پایان دشتی بروز نماید.

آلودگی: برخی از محدودیت‌ها در اثر عملکرد و فعالیت نادرست و بی‌رویه انسان ایجاد می‌گردد. آلودگی‌های ناشی از کاربرد کود و سم در امر کشاورزی و آلودگی‌های میکروبی و شیمیایی به‌واسطه دفع پساب‌های شهری و صنعتی از جمله محدودیت‌هایی هستند که انسان به خود و نسل‌های آینده تحمیل نموده است. در حوزه آبریز تعدادی از چاه‌های تأمین آب شرب دارای آلودگی‌های میکروبی (قارچی و کلیفرمی) هستند و چاه‌های دارای آلودگی شیمیایی نیز فراوان می‌باشند. در چنین شرایطی سامان‌دهی فاضلاب شهری و صنعتی و کاهش استفاده از انواع سموم و کود در کشاورزی به‌منظور حفاظت کیفی از منابع آب اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و ایجاد افت شدید در سطح آب ضمن آنکه خطر هجوم آب شور را به همراه دارد، موجب کاهش مستمر ذخیره ثابت و نابودی آبخوان نیز خواهد شد. افت شدید در سطح آب زیرزمینی همچنین ضرر و زیان‌های مالی از بابت کف‌شکنی احتمالی چاه‌ها، تغییر موتورپمپ‌ها و تغییر عمق نصب پمپ نیز متوجه مردم می‌نماید. افت سطح آب در اثر اضافه برداشت در بخش‌هایی از محدوده مطالعاتی مشاهده شده که کنترل بهره‌برداری و اجرای طرح‌های تقویت آبخوان می‌تواند مانع افزایش و یا حتی موجب جبران افت گردد.

بهره‌برداری بهینه

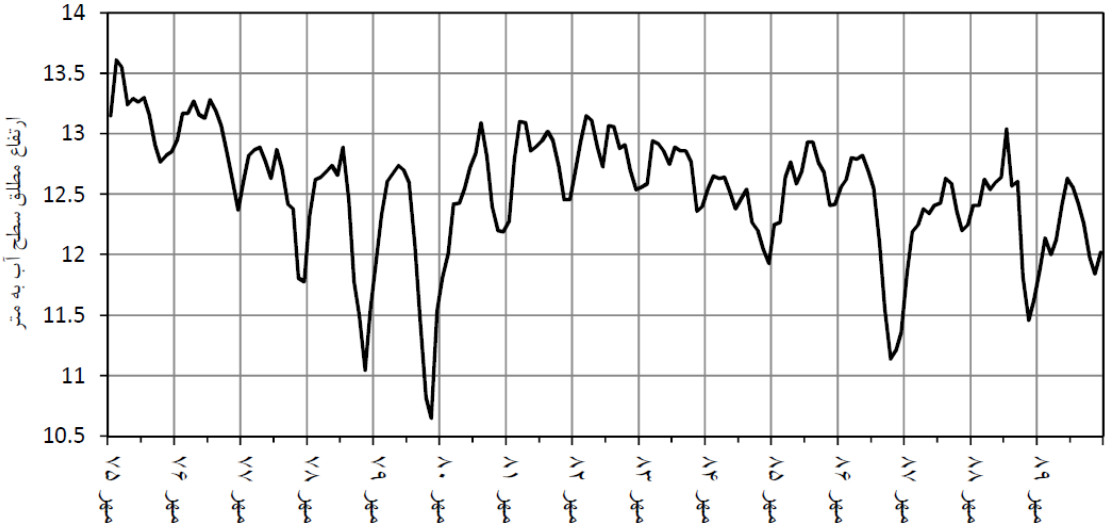
بخشی از تأمین آب مورد نیاز برای فعالیت‌های مختلف در محدوده مطالعاتی از منابع زیرزمینی است و در سال‌های کم باران که جریان‌های سطحی دچار کاهش می‌گردد، سهم بیشتری از طریق منابع زیرزمینی تأمین می‌گردد. در چنین شرایطی بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب ایجاد افت سطح آب، تنزل کیفی آب زیرزمینی و یا توسعه مخروط بالاآمدگی آب شور و یا پیشروی آب شور در اراضی ساحلی دشت‌های حوزه آبریز می‌شود. در نواحی مرکزی و شرقی جلگه مازندران استفاده از آب‌بندان به‌عنوان یک شیوه سنتی که با ویژگی‌های حوزه نیز انطباق دارد، رایج می‌باشد. آب‌بندان‌ها قادرند علاوه بر تأمین آب، از هدر رفتن آن نیز جلوگیری نموده و موجب تغذیه آبخوان‌های آبرفتی شوند. بدیهی است استفاده از منابع آب زیرزمینی که روند آن نیز از غرب به شرق افزایش می‌یابد، در همه حال به عنوان مکمل منابع آب سطحی باید مدنظر قرار گیرد. به این ترتیب ضمن تأمین آب مطمئن، از صدمات احتمالی به آبخوان جلوگیری خواهد شد. ارتفاع مطلق سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دشت بابل-آمل جهت شناخت و بهره‌برداری بهینه در جدول (۱) ارائه شده است.

در دشت‌های حوزه آبریز مسئله تأمین آب به‌ویژه آب شرب با توجه به اینکه باید از انواع آلودگی‌ها بری بوده و از کیفیت مناسب برخوردار باشد؛ نظر به افزایش جمعیت، افزایش سطح زیر کشت و توسعه شهرها و بالا رفتن مصرف سرانه حائز اهمیت می‌باشد. هم‌اکنون در نواحی پراکنده‌ای از حاشیه جنوبی جلگه ساحلی مازندران و بسیاری از مخروط افکنه‌ها از طرف آب منطقه‌ای مازندران مقررات توسعه بهره‌برداری اجرا می‌شود. گسترش سطوح این نواحی، جلوگیری از آلودگی آبخوان‌های آبرفتی و نیز پی‌جویی و اکتشاف منابع آب موجود در سازندهای کربناته که از آلودگی‌ها نیز به دور می‌باشند، در کنار امکان استفاده از آب سدهای مخزنی، گزینه‌هایی هستند که با توجه به محدودیت‌های زمانی و توجیه‌های فنی و اقتصادی باید موردتوجه برنامه‌ریزان قرار گیرد.

در کنار مسئله تأمین آب، الگوهای مصرف آن در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی باید مورد مطالعه قرار گرفته و روش‌هایی در خصوص افزایش بازده انتخاب و اجرا گردد. چراکه بعضاً تلفات و هدر رفتن آب به اشکال مختلف مانند تبخیر، رواناب و نفوذ عمقی در عرصه‌های گوناگون، بیش از نیمی از حجم آب مصرفی را شامل می‌شود. بنابراین افزایش راندمان در مصارف آب بدون هیچ تردیدی اولویت اول در برنامه‌ریزی‌های فرابخشی آب می‌باشد که با همکاری دستگاه‌های مختلف باید به مرحله اجرا گذاشته شود. زیرا تنها صرف هزینه‌های بسیار هنگفت در تأمین آب بدون بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال و عرضه و الگوهای مصرف نه تنها کمکی به توسعه اقتصادی-اجتماعی نمی‌کند، بلکه اثرات بسیار زیان‌باری را به‌همراه خواهد داشت. هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی بابل-آمل در یک بازه ۱۵ ساله که داده کاملی از آن در دسترس بود، طبق جدول (۲) محاسبه شده است.

جدول ۱- ارتفاع مطلق سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دشت بابل-آمل (متر از سطح دریا)

سال آبی	تعداد پلیگون	مساحت تیسن	مهر	آبان	آذر	دي	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۷۶- ۷۵	۵۵	۱۰۸۴.۷	۱۳.۱۵	۱۳.۶۱	۱۳.۵۵	۱۳.۲۴	۱۳.۲۹	۱۳.۲۶	۱۳.۳	۱۳.۱۶	۱۲.۹۱	۱۲.۷۷	۱۲.۸۲	۱۲.۸۵
۷۷- ۷۵	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۹۵	۱۳.۱۷	۱۳.۱۷	۱۳.۲۷	۱۳.۱۶	۱۳.۱۳	۱۳.۲۸	۱۳.۱۹	۱۳.۰۷	۱۲.۸۴	۱۲.۶۲	۱۲.۳۷
۷۸-۷۷	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۶۱	۱۲.۸۲	۱۲.۸۷	۱۲.۸۹	۱۲.۷۷	۱۲.۶	۱۲.۸۷	۱۲.۷۱	۱۲.۴۲	۱۲.۳۸	۱۱.۸۱	۱۱.۷۸
۷۹-۷۸	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۳۲	۱۲.۶۲	۱۲.۶۴	۱۲.۶۹	۱۲.۷۴	۱۲.۶۶	۱۲.۸۹	۱۲.۴۶	۱۱.۷۸	۱۱.۵	۱۱.۰۵	۱۱.۵۵
۸۰-۷۹	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۱.۹۶	۱۲.۳۳	۱۲.۶۱	۱۲.۶۷	۱۲.۷۴	۱۲.۷	۱۲.۶	۱۲.۰۸	۱۱.۴۶	۱۰.۸۲	۱۰.۶۵	۱۱.۵۴
۸۱-۸۰	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۱.۸۱	۱۲.۰۱	۱۲.۴۲	۱۲.۴۳	۱۲.۵۵	۱۲.۷۲	۱۲.۸۴	۱۳.۰۹	۱۲.۸۱	۱۲.۴	۱۲.۲	۱۲.۱۹
۸۲-۸۱	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۲۸	۱۲.۷۹	۱۳.۱	۱۳.۰۹	۱۲.۸۶	۱۲.۹	۱۲.۹۴	۱۳.۰۲	۱۲.۹۴	۱۲.۷۳	۱۲.۴۶	۱۲.۴۶
۸۳-۸۲	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۶۹	۱۲.۹۳	۱۳.۱۵	۱۳.۱۱	۱۲.۸۹	۱۲.۷۳	۱۳.۰۷	۱۳.۰۶	۱۲.۸۸	۱۲.۹۱	۱۲.۷	۱۲.۵۴
۸۴-۸۳	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۵۶	۱۲.۵۹	۱۲.۹۴	۱۲.۹۲	۱۲.۸۶	۱۲.۷۵	۱۲.۸۹	۱۲.۸۶	۱۲.۸۶	۱۲.۷۷	۱۲.۳۶	۱۲.۴
۸۵-۸۴	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۵۵	۱۲.۶۵	۱۲.۶۳	۱۲.۶۴	۱۲.۵۱	۱۲.۳۸	۱۲.۴۶	۱۲.۵۴	۱۲.۲۷	۱۲.۲	۱۲.۰۵	۱۱.۹۳
۸۶- ۸۵	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۲۵	۱۲.۲۷	۱۲.۶۴	۱۲.۷۷	۱۲.۵۹	۱۲.۶۹	۱۲.۹۳	۱۲.۹۳	۱۲.۷۶	۱۲.۶۸	۱۲.۴۱	۱۲.۴۲
۸۷- ۸۵	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۵۶	۱۲.۶	۱۲.۸	۱۲.۷۹	۱۲.۸۲	۱۲.۶۹	۱۲.۵۵	۱۲.۱	۱۱.۵۵	۱۱.۱۴	۱۱.۲۱	۱۱.۳۶
۸۸-۸۷	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۱.۸۵	۱۲.۱۹	۱۲.۲۵	۱۲.۳۸	۱۲.۳۴	۱۲.۴۱	۱۲.۴۳	۱۲.۶۳	۱۲.۵۹	۱۲.۳۶	۱۲.۲	۱۲.۲۵
۸۹-۸۸	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۲.۴۱	۱۲.۴۱	۱۲.۶۲	۱۲.۵۴	۱۲.۶	۱۲.۶۴	۱۳.۰۴	۱۲.۵۷	۱۲.۶۱	۱۱.۸۲	۱۱.۴۶	۱۱.۶۳
۹۰-۸۹	۵۷	۱۱۱۲.۵	۱۱.۸	۱۲.۱۴	۱۲	۱۲.۱۳	۱۲.۴۲	۱۲.۶۳	۱۲.۵۶۳	۱۲.۴۲	۱۲.۲۶	۱۱.۹۸	۱۱.۸۴	۱۲.۰۲



شکل ۳- هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی بابل-آمل

مدیریت آبخوان

برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی ضمن آنکه امکان تأمین نیازها را افزایش می‌دهد، در پاره‌ای موارد به نحوی موجب تقویت آبخوان نیز می‌گردد. در نواحی که امکان استفاده بیشتر از آب سطحی وجود دارد و یا می‌توان مازاد آن را به نواحی مجاور انتقال داد، لاجرم بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی

کاهش خواهد یافت. بنابراین اجرای برنامه‌های مناسب به منظور عدم ایجاد افت و به‌طورکلی تضعیف آبخوان‌ها بسیار مهم‌تر و کم‌هزینه‌تر از شرایطی است که در اثر بهره‌برداری بی‌رویه مشکلاتی را ایجاد نموده و سپس درصدد رفع آن با روش‌های مختلف تغذیه مصنوعی برآمد. هرچند آبخوان آبرفتی حوزه آبریز در حال تعادل می‌باشد ولی در اراضی مخروط افکنه‌ای و میان‌دشتی حوزه آبریز سطح آب زیرزمینی در حال افت می‌باشد. چاره‌جویی سریع و اعمال برنامه‌های حمایتی و تقویتی آبخوان موجب رفع سریع مشکل خواهد شد. درصورتی‌که روند افت سطح آب در اراضی مخروط افکنه‌ای ادامه یابد و به اراضی میان‌دشتی و پایان‌دشتی انتقال یابد، پدیده هجوم آب شور از اعماق و نیز به‌طور جانبی در کنار کاهش بازده آبخوان، به‌طور همه‌جانبه منطقه را تهدید خواهد نمود و در این صورت رفع مشکل و رساندن سفره‌ها به حالت تعادل نیاز به هزینه و زمان طولانی خواهد داشت.

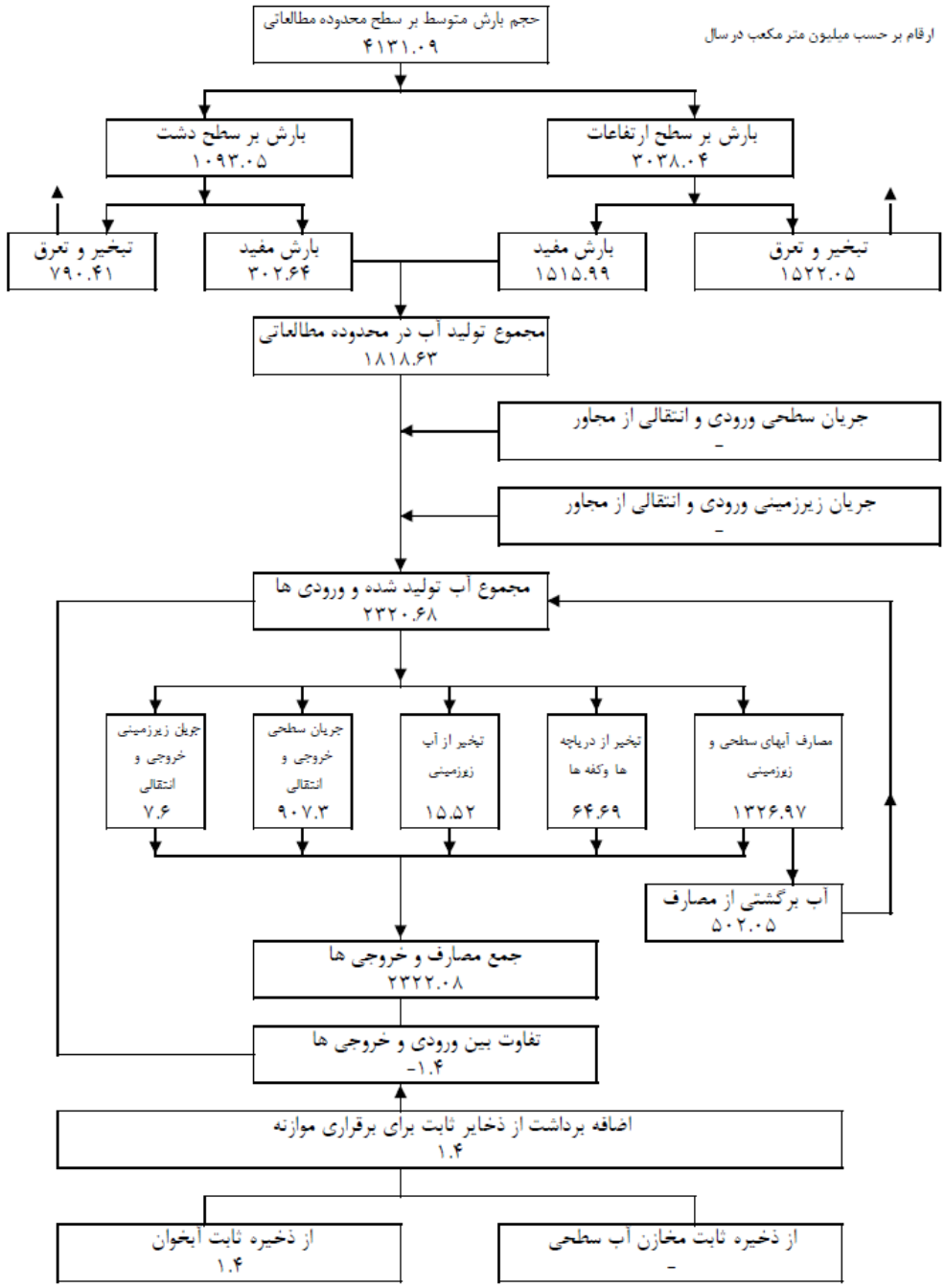
در شرایط کنونی مسئله پیشروی آب شور دریا و یا آبخوان شور شمالی به سمت آبخوان حاوی آب مناسب که به‌طور مختصر در شرق بابلسر و نیز محدوده مطالعاتی بهشهر-بندرگز آثاری از آن مشاهده شده است، مطالعات دقیق و بررسی‌های همه‌جانبه‌ای را به منظور تعیین حد مجاز برداشت از آبخوان‌های ساحلی و مجاور نواحی شور می‌طلبد. به منظور جلوگیر از هجوم آب شور در نواحی شمالی در بخش میانی دشت‌های مرکزی و شرقی حوزه آبریز می‌توان تعداد زیادی چاه بهره‌برداری و در عین حال تزریقی را حفر و دیواری از آب (پشته آبی) ایجاد نمود که با پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در آبخوان بخش جنوبی دشت که مکان‌های توسعه در آن تعیین شده است، مانع حرکت آب شور جبهه شمالی و احتمالاً آب دریا گردد و با حفظ و جلوگیر از آلوده‌شدن سفره آب زیرزمینی می‌توان در سال‌ها یا ماه‌های خشک که جریان‌های سطحی به حداقل می‌رسد و امکان تأمین آب به‌نگام فراهم نیست، کسری را از مخازن آب زیرزمینی جبران نمود. میزان برداشت اضافی از سفره که در یک دوره حداکثر پنج‌ماهه انجام می‌شود، از طریق جریان‌های پایه و سیلابی رودخانه‌ها، نفوذ بخشی از ریزش‌های جوی روی پهنه آبخوان و همچنین ایجاد تأسیسات تغذیه مصنوعی یا اقدامات حمایتی برای نفوذ به آبخوان، طی سال یا سال‌های مرطوب جبران می‌گردد. در این راستا استفاده از منابع آب سطحی قابل‌کنترل در سطح حوزه آبریز رودخانه‌های بین سفیدرود و قره‌سو نیاز به مطالعات دقیق و بررسی‌های همه‌جانبه‌ای دارد تا ضمن استفاده از منابع آبی مذکور باعث کاهش برداشت از منابع زیرزمینی و کاهش افت سطح آب گردد.

بیلان آب محدوده بابل-آمل

نوعی از بیلان آب محدوده مطالعاتی به‌صورت یک نمودار با نام نمودار چرخه آب در محدوده مطالعاتی نشان داده می‌شود. در این نمودار ارتباط بین عوامل مختلف آب‌های ورودی و خروجی با فلش نشان داده می‌شود. بر اساس نتایج اشکال مختلف بیلان، نمودار چرخه آب در محدوده مطالعاتی بابل-آمل تهیه و در شکل (۴) ارائه گردیده است. مطابق شکل (۴)، حجم کل بارندگی در سطح محدوده مطالعاتی بابل-آمل ۴۱۳۱/۰۹ میلیون مترمکعب در سال است. میزان بارندگی در سطح ناحیه کوهستانی ۳۰۳۸/۰۴ میلیون مترمکعب بوده که ۱۵۲۲/۰۵ میلیون مترمکعب آن به‌صورت تبخیر و تعرق واقعی از دسترس خارج شده و مابقی آن (۱۵۱۵/۹۹ میلیون مترمکعب در سال) بارش مفید است که بخشی از آن به شکل جریان سطحی درآمده و مقدار باقیمانده نفوذ عمقی می‌نماید. در سطح دشت حجم ریزش سالانه ۱۰۹۳/۰۵ میلیون مترمکعب بوده که ۷۹۰/۴۱ میلیون مترمکعب آن صرف تبخیر و تعرق می‌شود. حجم بارش مفید در سطح دشت برابر با ۳۰۲/۶۴ میلیون مترمکعب در سال است که بخشی از آن به شکل جریان سطحی درآمده و مقدار باقیمانده نفوذ عمقی می‌نماید. بنابراین حجم آب تولیدشده در سطح محدوده مطالعاتی ۱۸۱۸/۶۳ میلیون مترمکعب در سال است.

در محدوده مطالعاتی بابل-آمل جریان سطحی و یا زیرزمینی به حالت طبیعی و یا انتقالی از محدوده‌های مطالعاتی مجاور وجود ندارد. بر اساس بیلان آب زیرزمینی، حجم جریان‌های زیرزمینی خروجی و انتقالی از محدوده مطالعاتی برابر با ۷/۶ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. حجم جریان‌های سطحی خروجی از محدوده مطالعاتی بابل-آمل با احتساب پساب‌های ناشی از مصارف مختلف ۹۰۷/۳ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. بر اساس محاسبات به‌عمل‌آمده در بخش آب زیرزمینی، حجم تبخیر از آب زیرزمینی و تبخیر از سطح آزاد آب در محدوده مطالعاتی بابل-آمل برابر با ۱۵/۵۲ و ۶۴/۶۹ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. میزان مصرف آب از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در بخش شرب و صنعت ۱۱۴/۰۹ میلیون مترمکعب در سال و در بخش کشاورزی ۱۲۱۲/۸۸ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. حجم آب برگشتی از مصارف آب حدود ۵۰۲/۰۵ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده که بخشی از آن موجب تغذیه آبخوان آبرفتی شده و بخشی نیز به‌صورت زهاب به جریان‌های سطحی ملحق می‌شود.

توجه به توضیحات فوق، حجم مصارف و خروجی‌ها از محدوده مطالعاتی بابل-آمل ۲۳۲۲/۰۸ میلیون مترمکعب در سال و حجم آب تولیدشده و ورودی‌ها (به همراه آب برگشتی از مصارف) در سطح محدوده مطالعاتی ۲۳۲۰/۶۸ میلیون مترمکعب در سال است. بنابراین تفاوت ورودی‌ها و خروجی‌های محدوده مطالعاتی بابل-آمل ۱/۴- میلیون مترمکعب در سال است که معادل تغییرات حجم مخزن سفره محبوس دشت بابل-آمل می‌باشد.



شکل ٤- نمودار چرخه آب در محدوده مطالعاتی بابل-آمل

نتیجه‌گیری

جهت پیش‌گیری، کنترل و بهبود شرایط بحرانی مصارف آب در آبخوان‌ها، منابع آب زیرزمینی نیازمند مدیریت جامع فرابخشی و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی با لحاظ عوامل مختلف است. عوامل بسیار تأثیرگذار در بخش فنی مدیریت یکپارچه، شناخت علمی و دقیق وضعیت دشت‌ها و منابع آب است که از طریق تولید اطلاعات پایه در بخش‌های هواشناسی، هیدرولوژی، هیدروژئولوژی، هیدروژئومورفولوژی و غیره و بررسی آن‌ها به دست می‌آید. پس از شناخت وضعیت موجود، باید سناریوها و گزینه‌های متعدد علمی، مهندسی، مدیریتی و مدل‌سازی را جهت ایجاد یک مدیریت صحیح و متعادل، مورد آموزش و آزمایش قرار داد. این بررسی‌های علمی نیاز به ابزارهای گوناگونی دارد که یکی از آن‌ها مدل‌های ریاضی است.

اساساً هر بررسی علمی و فنی بر پایه ریاضی استوار است. بخصوص در بخش مهندسی آب، محاسبات ریاضی و به‌کارگیری آن نقش کلیدی دارد و نقش مدل‌های ریاضی در پیش‌بینی وضعیت منابع آب پررنگ‌تر از سایر روش‌ها و بررسی‌ها است. بنابراین ساخت مدل ریاضی سفره آب زیرزمینی و اعمال سناریوهای مدیریتی روی آن می‌تواند تا حد زیادی یک دید بهتر از شرایط آتی آن سفره جهت مدیریت بهتر بدهد.

آبخوان‌های شمالی علاوه بر تهدید شدن از لحاظ کمی، از نظر کیفی نسبت به سایر آبخوان‌های کشور بیشتر تهدید می‌شوند. نتایج بررسی‌های بیلان آبخوان آبرفتی بابل-آمل نشان می‌دهد حجم تغذیه این آبخوان ۳۱۲/۰۱ میلیون مترمکعب بوده که شامل جریان زیرزمینی ورودی، نفوذ از بارندگی سطح آبخوان، نفوذ از جریان‌های سطحی، نفوذ از آب زراعی و نفوذ از آب شرب و صنعت به ترتیب با حجم‌های ۳۵/۹۶، ۹۷/۵، ۳۱/۷۱، ۹۸/۶۳ و ۴۸/۲۱ میلیون مترمکعب می‌باشد. همچنین حجم تخلیه آن ۳۱۳/۴۱ میلیون مترمکعب بوده که متشکل از برداشت توسط چاه، چشمه و قنات آبرفتی، زهکشی، تبخیر از آبخوان و خروجی زیرزمینی به ترتیب با حجم‌های ۲۵۳/۸۱، ۳۶/۱۴، ۱۵/۵۲ و ۷/۹۴ میلیون مترمکعب می‌باشد که این اعداد و ارقام نمایانگر کسری حجم مخزن آبخوان به میزان ۱/۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. ملاحظه می‌شود بیلان سفره آب زیرزمینی آبخوان بابل-آمل از لحاظ تعادلی در وضعیت نسبتاً خوبی قرار داشته و همچنین سطح آب زیرزمینی آن در حالت تعادل نسبی است؛ به‌گونه‌ای که نهایتاً در طول سال ۳/۵ متر در برخی مناطق نوسان دارد اما در سال‌های اخیر به دلیل افزایش سطح زیر کشت برنج و کشت آن در دو فصل زراعی، از یک‌سو باعث پایین رفتن سطح آب آبخوان در فصل تابستان و در نتیجه پیشروی جبهه‌های آب شور از نواحی ساحلی و همچنین بالازدگی آب شور در برخی نواحی شده و از سوی دیگر میزان استفاده از کود و سم برای مزارع برنج بسیار بیشتر شده است که از مزارع برنج شسته شده و به لایه‌های پایین‌تر نفوذ می‌کند و در فصل‌های پر بارش با بالاآمدن سطح آب آبخوان باعث آلودگی سفره آب زیرزمینی می‌گردد. جهت جلوگیری از بحرانی شدن این مشکلات نیازمند مدیریت آبخوان می‌باشد تا هم تعادل آبخوان حفظ گردد و هم از لحاظ کیفی دچار آلودگی نشود. با تغذیه آبخوان به واسطه رواناب‌های سطحی در فصل پر آب در نواحی ساحلی می‌توان دیواره‌ای از آب برای جلوگیری از حرکت آب شور ساحلی به سمت آبخوان ایجاد کرد. همچنین با استفاده از زهکش چاه‌های کم‌عمق در مزارع برنج بخش زیادی از آبی که برای آبیاری مزارع از آب‌های سطحی استفاده گردیده و نفوذ کرده است و باعث بالاآمدن سطح آب آبخوان و مشکل زه دار شدن این نواحی شده است، تخلیه گردیده و هم مشکل زهکشی مزارع مرتفع می‌شود و هم بخش کمتری از منابع آب سطحی مصرف می‌گردد. بنابراین استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی کمک زیادی به حفظ تعادل بیلان منابع آبی می‌کند و از آلودگی این منابع تا حد زیادی جلوگیری به عمل می‌آورد. با توجه به شرایط خاص دشت‌های مازندران و وضعیت آبخوان‌هایی که برداشت آب از آن‌ها با هدف کشت اراضی شالیزاری صورت می‌گیرد، انجام چنین پژوهش‌هایی بسیار کاربردی بوده و می‌تواند مورد توجه ویژه مسئولین امر قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با عنوان "تهیه مدل مفهومی آبخوان بابل-آمل با استفاده از مدل GMS و ایجاد سناریوهای مدیریتی آتی با هدف پایداری آبخوان" می‌باشد. بنابراین نویسندگان مقاله از شرکت مدیریت منابع آب ایران بابت در اختیار گذاشتن داده‌ها و از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به دلیل تأمین هزینه‌های طرح پژوهشی با کد قرارداد ۰۳-۱۴۰۰-۰۲، کمال تشکر را دارند.

منابع

احمدی بادجانی، ع.، ملک محمودی، م.، رجایی، ط. و جوادی راد، م. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی عددی جهت ارائه رابطه‌ای برای برداشت بهینه آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان دامنه)، آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴ (۴): ۱۳۷۵-۱۳۶۲.

افضلی، آ. و شاهدی، ک. ۱۳۹۳. بررسی روند تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت آمل-بابل. مدیریت حوزه آبخیز. ۵ (۱۰): ۱۵۶-۱۴۴.

جمالی‌زاده، م. ع.، بذرافشان، ا.، مهدوی نجف آبادی، ر.، آذره، ع. و رفیعی ساردوئی، ا. ۱۳۹۹. پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های سری زمانی و GMS (مطالعهٔ موردی: دشت رفسنجان). اکوهیدرولوژی. ۷ (۱): ۱۰۹-۹۷.

خوش‌روش، م. و نیکزاد طهرانی، ا. ۱۳۹۷. ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب دشت تالار با استفاده از مدل‌سازی آب زیرزمینی و سیستم‌های یکپارچه منابع آب، مهندسی آبیاری و آب ایران. ۹ (۳۳): ۱۰۱-۸۹.

زینعلی، م.، گلابی، م. ر.، آذری، آ. و فرزی، س. ۱۳۹۷. بررسی عملکرد مدل مفهومی مادفلو و فرامدل شبیه ساز برنامه‌ریزی ژنتیک در مدل سازی هیدروگراف معرف آبخوان (مطالعه موردی: دشت لور-اندیمشک)، آبخوان و قنات. ۲ (۱): ۱۵-۱.

فاتحی مرج، ا.، طائی سمیرمی، م.، کلاهچی، ع. و میرنیا، س. خ.

۱۳۹۰. پیش بینی نوسانات سطح ایستابی آبخوان گربایگان برای دوره زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۴۳۷ با استفاده از مدل عددی MODFLOW. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۲ (۴): ۵۰-۴۱.

قبادیان، ر.، بهرامی، ز. و دباغ باقری، س. ۱۳۹۵. اعمال سناریوی مدیریتی در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با مدل مفهومی و ریاضی MODFLOW (مطالعهٔ موردی: دشت خزل-نهاوند. اکوهیدرولوژی. ۳ (۳): ۳۱۹-۳۰۳.

لاله‌زاری، ر. و کراچیان، ر. ۱۳۹۶. مدل‌سازی کمی و کیفی جریان آب زیرزمینی در آبخوان شهرکرد. آبخوان و قنات. ۱ (۱): ۳۷-۲۶.

مقامی مقیم، ع. ر. و تقی‌پور، ع. ا. ۱۳۹۸. بررسی عوامل مؤثر در تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی دشت صفی‌آباد شهرستان اسفراین. مهندسی اکوسیستم بیابان. ۸ (۲۲): ۴۲-۲۷.

ملک‌زاده، م.، کاردار، س.، صائب، ک.، شعبانلو، س. و تقوی، ل. ۱۳۹۷. پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های MODFLOW، ماشین آموزش نیرومند و ویولت-ماشین آموزش نیرومند. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴ (۵): ۳۸۵-۳۸۰.

ناصری، ا.، عباسی، ف. و اکبری، م. ۱۳۹۶. برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۸ (۶۸): ۳۲-۱۷.

یاری، ر. و درزی نفت‌چالی، ع. ۱۳۹۶. پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف مدیریتی با استفاده از مدل MODFLOW. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۸ (۲): ۱۱۵-۱۰۳.

Ahangari Hassas, M., and Taghizadegan Kalantari, N. 2022. The energy-water-food nexus: Concept, challenges and prospects. Journal of Energy Management and Technology. 6(1): 9-14.

Ahmed, S. S., Bali, R., Khan, H., Mohamed, H. I. and Sharma, S. K. 2021. Improved water resource management framework for water sustainability and security. Environmental Research. 111527.

Alcamo, J., Henrichs, T., and Rösch, T. 2017. World water in 2025: Global modeling and scenario analysis for the world commission on water for the 21st century.

Aslam, M., Arshad, M., Singh, V. P., and Shahid, M. A. 2022. Hydrological Modeling of Aquifer's Recharge and Discharge Potential by Coupling WetSpass and MODFLOW for the Chaj Doab, Pakistan. Sustainability. 14(8): 4421.

Bakas, T., Papadimitriou, I. and Argyri, P. 2020. Water crisis-beyond the destruction. Open Schools Journal for Open Science, 2.

Cosgrove, W. J. and Rijsberman, F. R. 2014. World water vision: making water everybody's business. Routledge.

Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., and Puma, M. J. 2017. Groundwater depletion embedded in international food trade. Nature. 543(7647): 700-704.

Emadodin, I., Reinsch, T. and Taube, F. 2019. Drought and desertification in Iran. Hydrology. 6(3): 66.

Franke, O. L., Reilly, T. E., and Bennett, G. D. 1987. Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems: an introduction.

Ghazi, B., Jeihouni, E. and Kalantari, Z. 2021. Predicting groundwater level fluctuations under climate change scenarios for Tasuj plain, Iran. Arabian Journal of Geosciences. 14(2): 1-12.

Harbaugh, A. W. 2005. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (pp. 6-A16). Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.

Karay, G., and Hajnal, G. 2015. Modelling of groundwater flow in fractured rocks. Procedia Environmental Sciences, 25: 142-149.

Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., and Arnold, J. G. 2008. Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. Journal of hydrology. 356(1-2): 1-16.

Kiraly, L. 2003. Karstification and groundwater flow. Speleogenesis and evolution of karst aquifers. 1(3): 155-192.

Konikow, L. F., Reilly, T. E., Barlow, P. M., and Voss, C. I. 2006. Groundwater modeling. In The handbook of groundwater engineering (pp. 815-866). CRC Press.

Ladi, T., Mahmoudpour, A. and Sharifi, A. 2021. Assessing impacts of the water poverty index components on the human development index in Iran. Habitat International. 113: 102375.

Liu, H. J., Hsu, N. S., and Lee, T. H. 2009. Simultaneous identification of parameter, initial condition, and boundary condition in groundwater modelling. Hydrological Processes: An International Journal. 23(16): 2358-2367.

McDonald, M. G., and Harbaugh, A. W. (2003). The history of MODFLOW. Groundwater. 41(2): 280.

Mirzaei, A., Saghafian, B., Mirchi, A., and Madani, K. 2019. The Groundwater–Energy–Food Nexus in Iran's Agricultural Sector: Implications for Water Security. Water. 11(9): 1835.

Mpouras, T., Polydera, A., Dermatas, D., Verdone, N., and Vilardi, G. 2021. Multi wall carbon nanotubes application for treatment of Cr (VI)-contaminated groundwater; Modeling of batch & column experiments. Chemosphere. 269: 128749.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., ... and Tarantola, S. 2008. Global sensitivity analysis: the primer. John Wiley & Sons.

Sanford, W. 2002. Recharge and groundwater models: an overview. Hydrogeology journal. 10(1): 110-120.

Sorkhabi, O. M. 2021. Iran Total Water Storage from May 2018 to 2020.

Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H. and Abbaspour, K. C. 2019. The future of extreme climate in Iran. Scientific Reports. 9(1): 1-11.

Viswanathan, S. P., Chellian, S. K., Varghese, S. and Semeon, J. 2022. Sustainable Water for Smart Villages–A Case Study. In Smart Villages (pp. 285-299). Springer, Cham.

Worch, E. (2021). Adsorption technology in water treatment. de Gruyter.

Yang, Y., Zhu, Y., Wu, J., Mao, W., Ye, M., and Yang, J. 2022. Development and application of a new package for MODFLOW-LGR-MT3D for simulating regional groundwater and salt dynamics with subsurface drainage systems. Agricultural Water Management. 260: 107330.

Zeydalinejad, N. 2022. Artificial neural networks vis-à-vis MODFLOW in the simulation of groundwater: a review. Modeling Earth Systems and Environment. 8: 2911-2932.

Zhou, Y., and Li, W. 2011. A review of regional groundwater flow modeling. Geoscience frontiers. 2(2): 205-214.

Owen, S. J., Jones, N. L., and Holland, J. P. 1996. A comprehensive modeling environment for the simulation of groundwater flow and transport. Engineering with computers. 12(3): 235-242.

Panahi, D. M., Kalantari, Z., Ghajarnia, N., Seifollahi-Aghmiuni, S. and Destouni, G. 2020. Variability and change in the hydro-climate and water resources of Iran over a recent 30-year period. Scientific Reports. 10(1): 1-9.

Pawels, R. and Tom, A. P. 2022. Sustainable water treatment technologies: a review. Sustainability, Agri, Food and Environmental Research. 10(1): 1-11.

Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Ghameshlou, A. N. and Khoshravesh, M. 2021a. The evaluation of DRAINMOD-S and AquaCrop models for simulating the salt concentration in soil profiles in areas with a saline and shallow water table. Journal of Hydrology. 598: 126259.

Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Khoshravesh, M. and Azamathulla, H. M. 2021b. Improving rice water productivity using alternative irrigation (case study: north of Iran). Water Supply. 21(3): 1216-1227.

Priyanka, B. N., and Mahesha, A. 2015. Parametric studies on saltwater intrusion into coastal aquifers for anticipate sea level rise. Aquatic Procedia. 4: 103-108.

Rovida, E. and Zafferri, G. 2022. Human Aspects of Technology. In The Importance of Soft Skills in Engineering and Engineering Education (pp. 149-159). Springer, Cham.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 17, Jun.-Jul. 2023, p. 221-236

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۷، خرداد - تیر ۱۴۰۲، ص. ۲۳۶-۲۲۱

Studying the Babol-Amol Aquifer and Presenting Future Management Scenarios with the Aim of Quantitative and Qualitative Stability of the Aquifer

M. Khoshravesh[1*], M. Pourgholam-Amiji[2], M. Moogooei[3]
Recived: Dec.11, 2022 Accepted: Jan.01, 2023

Abstract

The increase in population, industrialization and following climate change has put a lot of pressure on water resources. Due to the current water limitation as well as low rainfall and drought in recent years, food security and agricultural production have entered the stage of serious danger. It is true that in order to use water-bearing products, one should turn to the import and trade of virtual water, but even if possible, one should use the available resources (water and land) optimally and achieve sustainable production. The groundwater resources and their correct management and optimal use are one of the solutions that can bring water and food security to the country while paying attention to the stability of aquifers. These scientific investigations require various tools, one of which is mathematical models. Today, the role of mathematical models in investigating the state of water resources is more prominent than other methods. Therefore, building a mathematical model of the groundwater table and applying management scenarios to it can provide a better view of the future conditions of that aquifer for better management. This research was conducted with the aim of building a conceptual model of the Babol-Amol plain aquifer and investigating the water balance, over-harvesting, the amount of water entering and leaving the study area, and management measures for the sustainability of the current and future situation based on the data of 1985-2021. The results of the water balance investigations of the Babol-Amol alluvial aquifer show that the recharge volume of this aquifer is equal to 312.01 and its discharge volume is 313.41 million cubic meters, which represents the deficit of the volume of the aquifer by 1.4 million cubic meters. It can be seen that the balance of the groundwater table of the Babol-Amol aquifer and accordingly its groundwater level is in relative harmony, but in recent years, on the one hand, due to the increase in the area under rice cultivation in two cropping seasons in the summer, the water level of the aquifer has decreased, and on the other hand, the use of fertilizers and poisons for rice fields has increased significantly. Fertilizers are also drained from the rice fields and seep into the lower layers, and in the rainy season, the rise of the aquifer water level causes the pollution of the groundwater. Also, in the rainy season, due to more leaching, more pollution enters the aquifer and causes the accumulation of pollutants in the aquifer and as a result it becomes more polluted. To prevent these problems from becoming critical, this aquifer needs strategic management in order to maintain the balance of the aquifer and not be polluted in terms of quality, so well drainage in rice fields is one of the solutions recommended for further investigation.

Keywords: Recharge and Discharge, Surface and Groundwater Interaction, Water Balance Modeling, Water Crisis.

1-Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2-Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3-Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
(*Corresponding Author: M.khoshravesh@sanru.ac.ir, Khoshravesh_m24@yahoo.com)