شبیه‌سازی آبخوان دشت سملقان با استفاده از مدل‌های SWAT و MODFLOW

شیما نصیری، حسین انصاری* و علی‌نقی ضیائی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱)

چکیده

کاهش منابع آب سطحی و خشکسالی‌های پی در پی و درنتیجه استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به‌ویژه برای مصارف کشاورزی، باعث به بار آمدن خسارات جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی کشور شده است. در این میان، آگاهی از وضعیت بیلان آبی دشت می تواند در مدیریت مناسب منابع آب منطقه کمک فراوانی کند. دشت سملقان در اقلیم نیمه‌خشک در استان خراسان شمالی واقع شده است. از آنجایی که منابع آب سطحی به منظور تأمین آب قابل اعتماد نبوده، لذا منبع اصلی تأمین آب مورد نیاز در منطقه چاه است. به‌دلیل وجود رودخانه ها در دشت، ضخامت کم آبرفت، نوسانات تراز آب زیرزمینی و عدم قطعیت زیاد در محاسبات ضرایب هیدرودینامیک آبخوان، ضرورت انجام مطالعات دقیق هیدروژئولوژیکی و تعیین نقش هر یک از پارامترهای مؤثر بر جریان آب زیرزمینی دارای اهمیت است. تحقیق حاضر به‌منظور شبیه‌سازی آبخوان سملقان و بررسی بیلان آبی برای سال‌های ۱۳۸۳تا ۱۳۹۳ با مدل MODFLOW انجام شد. مقدار تغذیه آب زیرزمینی نیز از طریق مدل SWAT برآورد شد. واسنجی مدل با خطای ۱/۱ درصد و صحت سنجی با مقدار خطای ۱/۲ درصد نشان‌دهنده برآورد مناسب بین تراز آب شبیه سازی شده و برآورد شده است. بررسی هیدروگراف آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای نشان داد که تغییرات سطح آب در اکثر نقاط دارای نوسانات ماهیانه و فصلی زیادی است. بعد از ترسیم خطوط هم‌پتانسیل دشت، ورودی‌ها و خروجی‌ها شناسایی و با استفاده از تعیین تغییرات حجم ذخیره، بیلان دشت تعیین شد. نتایج نشان داد که بیلان دشت منفی بوده و کسری مخزن به میزان ۹/۱۴- میلیون مترمکعب برآورد شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی وضعیت آبخوان و مدیریت منابع آب در منطقه بهره برد.

واژه‌های کلیدی: تراز آب زیرزمینی، تغذیه، بیلان آب، ارتباط آبخوان-رودخانه ، SWAT، MODFLOW

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: ansary@um.ac.ir

مقدمه

محدودیت منابع آب شیرین در بسیاری از کشورها به‌صورت یک معضل جدی درآمده و توسعه کشورها را تحت تأثیر خود قرار داده است. عواملی نظیر محدودیت منابع آب های سطحی، موجب روی آوردن بیشتر بشر به منابع آب زیرزمینی برای تأمین نیازهای روزافزون خود شده است. امروزه حتی در مناطقی که بارندگی زیاد بوده و منابع آب سطحی وجود دارد، برای جبران کمبود آب با کیفیت مناسب از آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود (۷). با توجه به اینکه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، آب زیرزمینی مهم ترین منبع برآورده کردن نیازهای آبی است، این تهدیدها بیشتر متوجه آبخوآنها شده است و پیامدهایی مانند کاهش سطح آب زیرزمینی، نفوذ آب شور در آبخوآنهای ساحلی، نشست زمین و از بین رفتن تالاب‌ها و دریاچه‌ها را به‌دنبال داشته است. از این‌رو برای جلوگیری از ادامه افت کمّی و آلودگی این منابع و رسیدن به توسعه پایدار، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های‌زیرزمینی امری ضروری است. برای مدیریت آب‌های زیرزمینی به اطلاعات زیادی در مورد خصوصیات آبخوان نیاز است که به‌دست آوردن آنها دشوار و معمولاً با هزینه و عدم قطعیت زیاد همراه است. در این رابطه، مدل‌ها، به‌ویژه مدل‌های ریاضی، امکان بررسی کم‌هزینه و مؤثر سیستم‌های پیچیده آب زیرزمینی را فراهم کرده اند. با توجه به اینکه در یک سامانه، آب سطحی و زیرزمینی از هم جدا نبوده و از لحاظ فیزیوگرافی، آب و هوایی و هیدرولوژیکی با یکدیگر در ارتباط هستند، لذا توسعه یکی از آنها به‌طور مطمئن بر دیگری اثر خواهد گذاشت. بنابراین آگاهی از مفاهیم اساسی اندرکنش بین آب‌سطحی و زیرزمینی برای مدیریت مؤثر منابع آب ضروری است (۱۴). سرانجامِ همه مطالعات انجام شده، ارائه مدل جریان زیرزمینی MODFLOW توسط مک دونالد و هاربرگ با استفاده از روش تفاضل‌های محدود توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا در سال ۱۹۸۸ بوده است. این مدل به‌عنوان یک مدل شبیه ساز جریان در آبخوان و با توجه به قابلیت زیاد و داشتن زیربرنامه های مختلف که دربرگیرنده پارامترهای گوناگون تشکیل دهنده یک سیستم آب زیرزمینی است، تقریباً مدل کاملی از نظر مدل‌سازی عددی جریان است و به‌همین دلیل مورد قبول اکثریت هیدرولوژیست‌ها واقع شد (۹). پژوهشگران در کشورهای مختلف در زمینه‌های گوناگون از این مدل استفاده کرده و نتایج متعددی را ارائه کرده‌اند. صفوی و بحرینی (۱۳) شبیه‌سازی اندرکنش آب های سطحی و زیرزمینی در شرایط جریان ماندگار و ناماندگار در دشت نجف‌آباد را با درنظر گرفتن عدم قطعیت در وضعیت زمین‌شناسی توسط مدل MODFLOW ارائه کردند. نتایج مدل نشان داد که جریان برگشتی از زمین‌های کشاورزی و نشت از رودخانه زاینده‌رود سهم قابل توجهی را در موازنه آبی منطقه شامل می‌شوند. کیو و همکارن (۱۲) با شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی حوضه رودخانه جیلین، چین، با مدل MODFLOW، دریافتند میزان برداشت از منطقه بیش از تغذیه است. ضیائی و محمدی (۱۶) نیز در دشت بجنورد به‌کمک این مدل نشان دادند که با کامل نشدن شبکه فاضلاب شهری سطح آب زیرزمینی در چند سال آینده بالا آمده و بخش وسیعی از شهر مستغرق می‌شود. چاکرابورتی و همکاران (۴) شبیه سازی تراز آب زیرزمینی را برای مناطق ساحلی در هندوستان، انجام داده و نتیجه گرفتند برای آب زیرزمینی از جنوب به شمال همان گونه که برخورد سفره های آب شور با آبخوان ساحلی اتفاق می‌افتد، است. اکثر مدل‌های آب زیرزمینی مورد استفاده در کاربردهای دنیای واقعی، توزیعی و دارای مبنای فیزیکی هستند. برای مثال، در این مدل ها تغذیه متأثر از بارندگی، تبخیر و تعرق، استفاده از آب زیرزمینی و سطحی برای آبیاری و غیره برحسب فرایندهای هیدرولوژیک درنظر گرفته نشده و به‌عنوان پارامتر ورودی مدل شناخته می‌شود که باید در مرحله واسنجی و از طریق آزمون و خطا مشخص شود. بدون تخمین مناسب از مقدار تغذیه به‌عنوان مهم ترین مؤلفه معادله بیلان آب و نیز تغییرات مکانی و زمانی آن، نتایج این مدل‌ها قابل اعتماد نیست. بنابراین اگر مقدار دقیق تغذیه موجود نباشد نمی‌توان تأثیر برداشت از آبخوان را به‌طور مناسبی ارزیابی کرد و به رفتار

آبخوان تحت سناریوهای مختلف مدیریتی اعتماد پیدا کرد (۳). یکی از مدل هایی که امروزه به منظور برآورد مقدار تغذیه آبخوان از طریق منابع آب سطحی، کاربرد زیادی دارد، مدل مفهومی، نیمه توزیعی و در مقیاس حوضه آبریز SWAT(Soil and Water Assessment Tool) است که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی امریکا تهیه شده و در شبیه‌سازی حوضه آبریز به‌صورت پیوسته در مقیاس روزانه عمل می‌کند (۲). در این مدل تأثیر تمامی عوامل مؤثر در میزان نفوذ آب به آبخوان درنظر گرفته شده و میزان تغذیه برآورد می‌شود. در این پژوهش، هدف شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی و تخمین میزان کسری مخزن از طریق برآورد پارامترهای بیلان آب و همچنین بررسی ارتباط بین آبخوان و رودخانه با استفاده از مدل MODFLOW در نرم‌افزارGMS است. از آنجا که مقدار تغذیه آب زیرزمینی که یکی از مهم‌ترین عوامل در تهیه مدل آب زیرزمینی بوده و تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله شرایط هواشناسی و هیدرولوژیکی و زمین شناسی منطقه است که به کمیت درآوردن آن بسیار مشکل است در این مدل‌ها به‌صورت دقیق لحاظ نشده و معمولاً مقدار تغذیه به‌صورت درصدی از بارش به مدل اعمال می‌شود، در این پژوهش مقدار تغذیه آبخوان از نتایج خروجی بیلان مدل آب سطحی (SWAT) با درنظر گرفتن تمامی پارامترهای موثر بر آن در مدل تعیین و به مدل آب زیرزمینی وارد شد. از آنجا که این تحقیق جزء اولین مطالعات در زمینه مدل سازی آبخوان کارستی سملقان با درنظر گرفتن شرایط واقعی از جمله (منابع تغذیه/ تخلیه، جریانهای برگشتی، پوشش خاک، زهکشی و ....) است، این تحقیق می‌تواند اطلاعات مفیدی را در زمینه آبخوان سملقان، برآورد بیلان و پیش بینی شرایط آبخوان تحت سناریوهای مختلف مدیریتی فراهم کند.

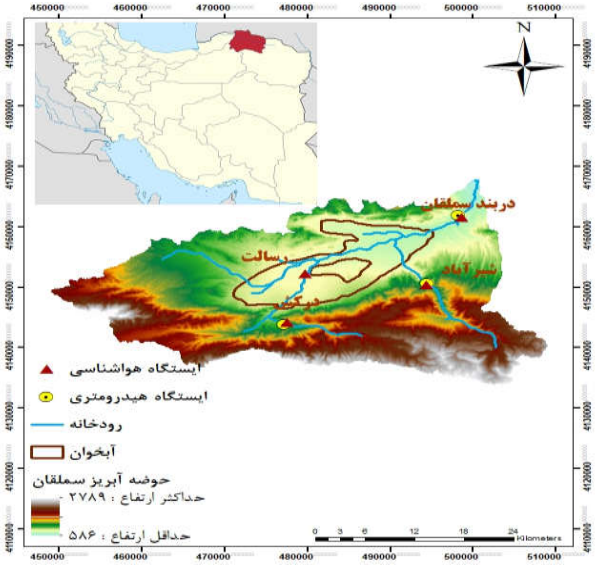
مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد پژوهش

محدوده مطالعاتی سملقان با وسعتی معادل ۱۱۴۸ کیلومتر مربع در حوضه آبریز اترک و در استان خراسان شمالی واقع شده است که مساحتی در حدود ۹۲۷ کیلومتر مربع آن ارتفاعات و مابقی شامل محدوده دشت است. این محدوده بین مختصات جغرافیایی '۲۵ ـ ۵۶ تا '۰۶ ـ ۵۷ طول شرقی و '۲۱ ـ ۳۷ تا '۳۹ ـ ۳۷ عرض شمالی واقع شده است. مرتفع ترین و پست‌ترین نقاط از سطح دریا به‌ترتیب ۲۷۸۹ و ۵۸۶ متر است. متوسط بارش محدوده ۴۶۵ میلی متر و متوسط دما ۱۱ درجه سانتی گراد است. در این حوضه ۳ ایستگاه باران سنجی و یک ایستگاه تبخیرسنجی برای ثبت مقادیر بارش و دما به‌صورت روزانه وجود دارد. رودخانه اصلی دشت رودخانه سملقان است. مساحت آبخوان آبرفتی سملقان حدود ۱۵۸ کیلومتر مربع بوده و در محدوده آبخوان تعداد ۲۰۵ چاه، ۲۵ چشمه و ۷ دهانه قنات وجود دارد. طبق مطالعات زمین‌شناسی و ژئوالکتریک، آبخوان دشت از نوع یک لایه و آزاد بوده و اندازه ذرات در نقاط مختلف دشت از تنوع بسیار زیادی برخوردار است. ناحیه مورد مطالعه از آبرفت های جوان و آهک با لایه های مارن و شیل و نیز ماسه سنگ و کنگلومرا تشکیل شده است. در مرکز دشت بیرون زدگی مربوط به سازند خانگیران گسترش یافته است که لیتولوژی این سازند شامل شیل و شیل آهکی بوده، به‌طوری که این بیرون‌زدگی توپوگرافی سنگ بستر آبخوان را تغییر داده و سفره آبرفتی را از حالت یکنواخت خارج ساخته است. سطح آب زیرزمینی دشت سملقان مانند اکثر دشت‌های ایران به‌دلیل خشکسالی‌های طولانی‌مدت و استخراج بیش از حد به‌خصوص در بخش کشاورزی همچنان روبه کاهش است. موقعیت محدوده مطالعاتی، در شکل (۱) نمایش داده شده است.

معرفی مدل MODFLOW

این مدل، جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل را به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی می‌کند و به‌دلیل قابلیت اعتبارسنجی گسترده آن در شبیه‌سازی سیستم‌های مختلف، به عنوان یک



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

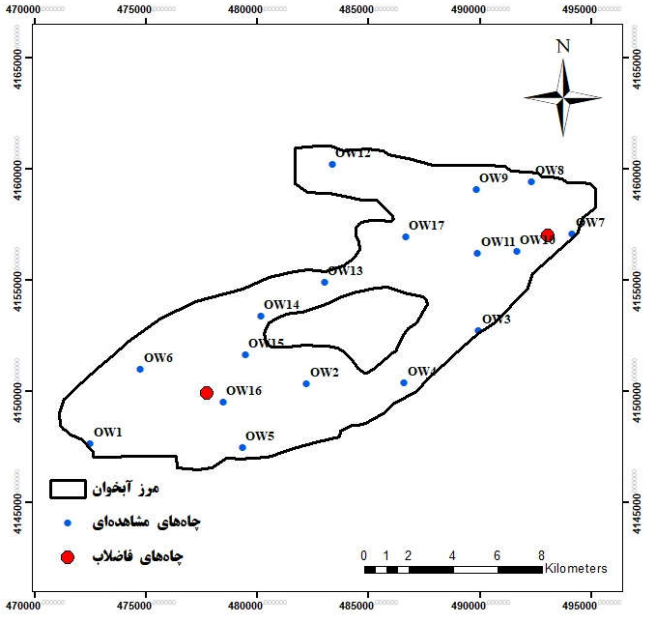
مدل استاندارد جریان در سراسر جهان پذیرفته شده است که از معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کند. معادله دیفرانسیل جزئی ذیل که از ترکیب شکل سه بعدی معادله دارسی و معادله پیوستگی حاصل می‌شود، معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در محیط اشباع است (۹).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_s\frac{\partial h}{\partial t}\pm W \quad (1)$$

که در آن Ss ضریب ذخیره ویژه (1/L)، h بار آبی (L)، t زمان (T)، Kxx، Kyyو Kzz به‌ترتیب مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x،y و z هستند W.(L/T) فلاکس حجمی جریان در واحد حجم (1/T)، که برای تخلیه منفی و برای تغذیه مثبت است. این معادله با توجه به شرایط آبخوان مورد مطالعه مبنی بر همگن یا ناهمگن بودن، همروند یا ناهمروند بودن و ماندگار یا ناماندگار بودن قابل ساده‌سازی است. مدل برای حل این معادله از روش تفاضل محدود استفاده می‌کند (۹). در این مطالعه با توجه به یک لایه درنظر گرفتن آبخوان، معادله جریان دو بعدی سطحی در محیط اشباع در شرایط ناهمگن و ناهمروند درنظر گرفته شد.

مدل‌سازی آبخوان دشت سملقان

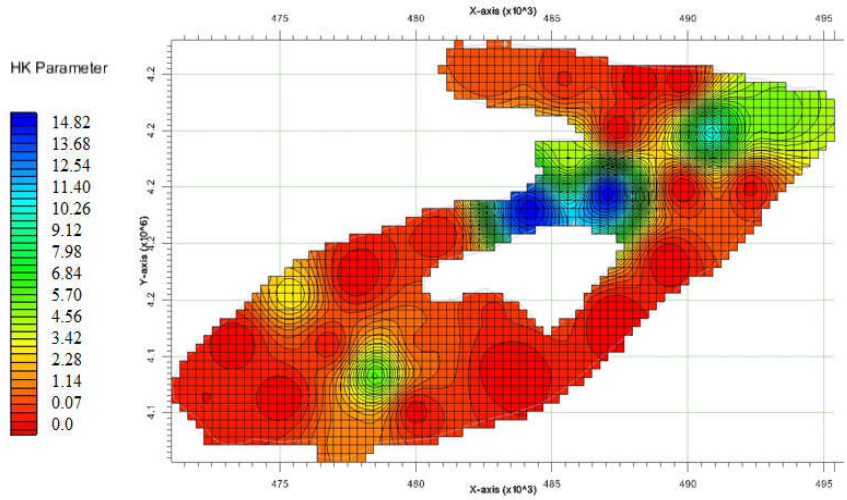
درک یک سامانه آب زیرزمینی معمولاً مستلزم حفر تعداد زیادی چاه های اکتشافی، حفاری و عملیات پمپاژ و آزمایش های ژئوفیزیک متعدد که اغلب گران و پرهزینه اند است. از آنجا که در منطقه مورد مطالعه، مطالعات میدانی بسیار کمی انجام شده است، درنتیجه مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی از طریق یک مدل ریاضی می تواند بسیار مفید باشد. اولین گام در مدل‌سازی توصیف مدل مفهومی است (۱۱). مدل مفهومی پایه مدل ریاضی بوده که خود بر پایه اطلاعات اولیه داده های صحرایی و تعبیر و تفسیرهای هیدروژئولوژیکی استوار است و تهیه آن مستلزم تلفیق دقیق داده‌ها، اطلاعات و گزارش‌های مربوط به آبخوان و جریان آب زیرزمینی در محدوده است. تعیین شرایط مرزی در مدل مفهومی و مدل‌سازی سامانه‌های جریان آب زیرزمینی، ضروری است. به‌منظور تعیین حدود فیزیکی اولیه آبخوان از اطلاعات موجود در شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی استفاده شد. با توجه به اینکه ورودی های آب سطحی در قسمت جنوب و جنوب شرقی و خروجی آن در قسمت شمال شرقی آبخوان قرار دارد، بخش‌هایی از مرز که در این مکآنها واقع شده بود برای مدل عددی مرز با بار مشخص



شکل ۲. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و چاه‌های تغذیه در آبخوان

درنظر گرفته شد. سایر مرزها نیز به صورت مرز بدون جریان لحاظ شد. برای شرایط اولیه نیز در مدل‌سازی ماندگار و ناماندگار سطح آب مشاهده شده در مهرماه ۸۴-۱۳۸۳ پس از پهنه‌بندی در تمام سلول‌ها لحاظ شد. در شبیه‌سازی آبخوان، اندازه سلول ها در کل محدوده مورد مطالعه ۲۵۰×۲۵۰ متر درنظر گرفته شد. تعداد سلول های شبکه در جهت افقی و عمودی به‌ترتیب ۵۴ و ۹۰ عدد بود که از این تعداد حدود ۱۷۵۴ سلول فعال وجود داشت. به منظور بررسی های کمی و اندازه‌گیری نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان تعداد ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای حفر شد که اندازه‌گیری سطح آب به‌صورت ماهیانه در آنها صورت می گیرد. بررسی آمار چاه‌های بهره‌برداری نیز نشان داد که میزان برداشت از این منابع در محدوده آبخوان حدود ۳۹/۶ میلیون مترمکعب بوده که از این مقدار حدود ۳۷/۳ میلیون متر مکعب در بخش کشاورزی و مابقی در سایر بخش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو چاه فاضلاب نیز در محدوده وجود دارد که به‌دلیل عدم وجود شبکه فاضلاب در منطقه، به‌عنوان دو چاه تغذیه به منظور محاسبه مؤلفه آب برگشتی توسط فاضلاب به مدل اعمال شد. شکل (۲) موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و فاضلاب را نشان می‌دهد.

از مهم ترین و حساس ترین پارامترها در تهیه مدل، ضرایب هیدرودینامیکی شامل هدایت هیدرولیکی (K) و آبدهی ویژه (Sy) است که تا حد امکان باید برآورد دقیقی از آنها وجود داشته باشد. روش‌های مختلفی برای برآورد این ضرایب ارائه شده است که کاربردی‌ترین این روش‌ها، آزمایش‌های پمپاژ هستند. در این مطالعه به‌علت محدود بودن تعداد آزمایش های پمپاژ، برای تهیه نقشه هدایت هیدرولیکی از لاگ چاه‌های اکتشافی، چاه‌های مشاهده‌ای، مطالعات ژئوفیزیک و آزمایش های پمپاژ انجام شده در منطقه استفاده شد. پس از برآورد هدایت هیدرولیکی خاک مقدار آبدهی ویژه با استفاده از رابطه ($Sy=0.1\sqrt{k}$) برآورد و سپس در مدل به‌عنوان مقادیر اولیه آبدهی ویژه مورد استفاده قرار گرفت و ضمن واسنجی مدل مقادیر این ضرایب اصلاح شد. شکل (۳) پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی در محدوده آبخوان را نشان می دهد. درنهایت به‌منظور واسنجی مدل یک دوره ۸ ساله (۱۳۹۱-۱۳۸۳) و برای صحت‌سنجی یک دوره دو ساله (۱۳۹۳-۱۳۹۱) انتخاب شد.



شکل ۳. پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی بعد از واسنجی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی اثربخشی و قابلیت پیش‌بینی مدل در دوره‌های واسنجی و صحت سنجی، از معیارهایی نظیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد شده (NRMSE) استفاده می‌شود (۱۵). معیار NRMSE به این دلیل انتخاب می‌شود که دامنه نوسانات تراز آب زیرزمینی برای هر چاه مشاهده‌ای در دوره‌های واسنجی و صحت سنجی متفاوت بوده و به نظر می‌رسد که مقدار ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد شده بیشتر بیانگر خطای واقعی باشد. معیار NRMSE برای کل دشت از روابط ذیل محاسبه می‌شود:

$$\text{WeightedRMSE} = \frac{\sum \text{RMSE}_i \times a_i}{A} \quad (۲)$$

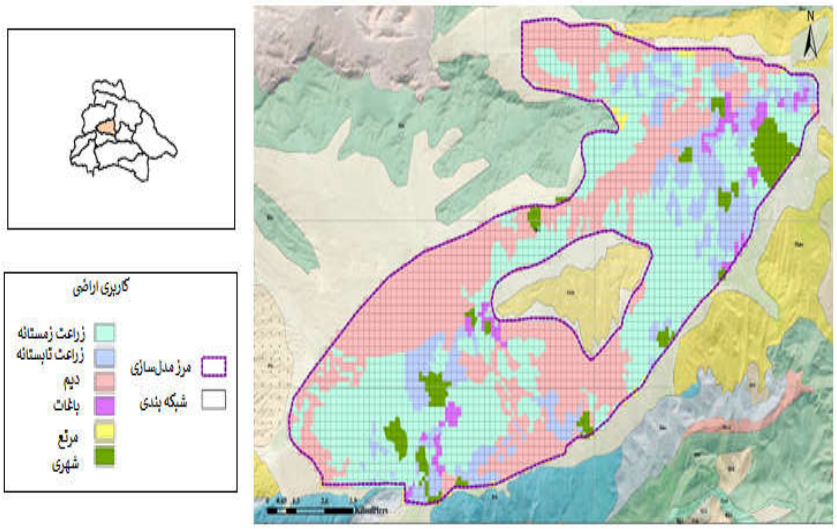
$$\text{Weighted draw down} = \frac{\sum \Delta h_i \times a_i}{A} \quad (۳)$$

$$\text{Normalized RMSE} = \frac{\text{Weighted RMSE}}{\text{Weighted drawdown}} \quad (۴)$$

که در این روابط اندیس i نمایشگر هر چاه مشاهده‌ای، a مساحت هر پلیگون، A مساحت کل محدوده دشت و Δh اختلاف بین حداقل و حداکثر نوسان تراز آب زیرزمینی است.

برآورد تغذیه آبخوان با استفاده از مدل *SWAT*

تغذیه یکی از چالش برانگیزترین پارامترها در تعیین مؤلفه های بیلان آب زیرزمینی است. به‌طور کلی در نواحی خشک و نیمه خشک مقدار تغذیه مستقیم از بارش بسیار کوچک بوده و معمولاً کمتر از ۵ درصد متوسط بارش سالانه است. جریان ورودی از مرز فوقانی آبخوان در مطالعات مدل‌سازی آب زیرزمینی "تغذیه" خوانده می شود که مرکب از نفوذ مستقیم از بارش و نفوذ از بستر رودخانه و همچنین جریان برگشتی حاصل از آب برداشت شده از آبخوان برای مصارف مختلف (آبیاری، صنعتی و شهری) است. دو منبع دیگر تغذیه آبخوان (از طریق درز و شکاف های موجود در نواحی کوهستانی، از مخروطه‌افکنه‌های واقع در دامنه کوه‌ها) به‌عنوان جریان ورودی جانبی به محدوده مدل‌سازی درنظر گرفته می‌شوند. مقدار تغذیه آبخوان یکی از مهم‌ترین عوامل در تهیه مدل آب زیرزمینی است. در این مطالعه برای شناسایی وضعیت تغذیه، مدل سازی آب سطحی توسط مدل SWAT انجام شد و مؤلفه های اصلی بیلان آب سطحی حوضه توسط مدل واسنجی شده مورد ارزیابی و تحلیل قرارگرفت. نتایج نشان داد که مدل سطحی پدیدهٔ فیزیکی جریان آب زیرزمینی در دشت سملقان را نیز کاملاً درنظر گرفته است، زیرا این مدل تمام پارامترهای

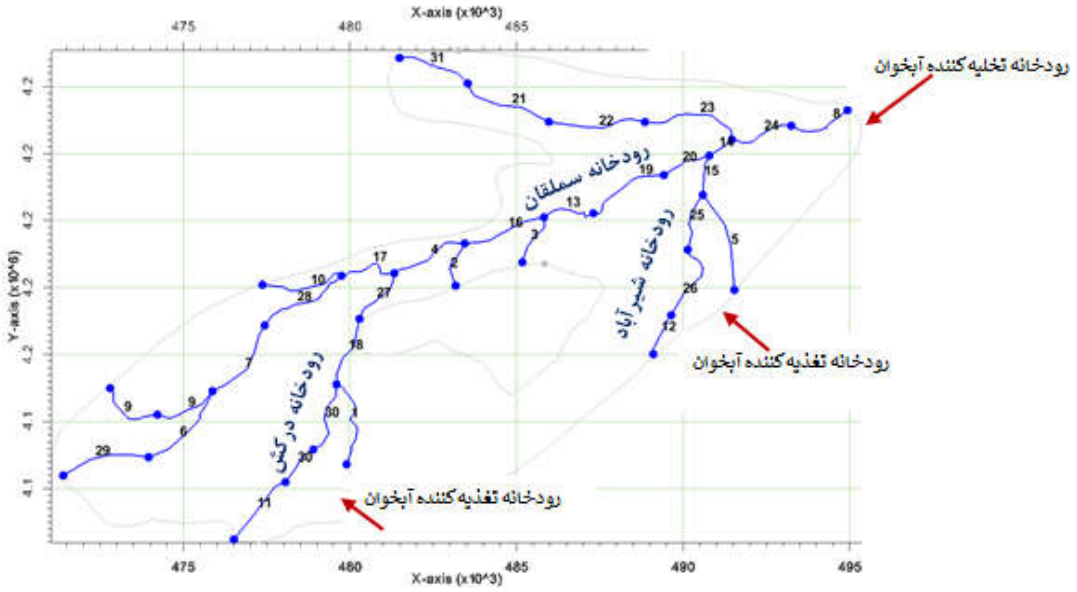


شکل ۴. واحدهای هیدرولوژیک در محدوده آبخوان (رنگی در نسخه الکترونیکی)

مؤثر در برآورد جریان آب زیرزمینی از قبیل توپوگرافی، زمین شناسی، خاک، کاربری اراضی، آب و هوا و بیشتر مدیریت گیاه را درنظر می گیرد و بر این اساس مقدار آب نفوذ یافته به آب زیرزمینی را برآورد می‌نماید. لذا یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در مدل سازی آب زیرزمینی، نتایج مدل SWAT است (۱۰). با توجه به نتایج مدل سطحی، در محدوده مدل‌سازی، ۸۴ واحد هیدرولوژیکی (HRU: Hydrologic Response Unit)، واحدهایی با شرایط خاک، کاربری اراضی و شیب یکسان، با شش کاربری اراضی دیم، باغات، مناطق شهری و اراضی آبی (زمستانه و تابستانه) و مرتع قرار دارد که مقادیر نفوذ برای آنها برآورد و به مدل اعمال شد (۵). شکل (۴) واحدهای هیدرولوژیکی موجود در محدوده آبخوان را نشان می‌دهد.

ارتباط آبخوان و رودخانه

رودخانه‌ها یکی از منابع عمده تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی هستند (۸). مهم‌ترین منبع آب سطحی در منطقه، رودخانه سملقان است که از سرشاخه های رودخانه اترک بوده و دارای دو سرشاخه اصلی، شیرآباد و درکش است. این رودخانه از جنوب غرب دشت به‌سمت شمال شرق جریان دارد. در حال حاضر در محدوده سملقان سه ایستگاه هیدرومتری شیرآباد، درکش و دربند سملقان برای اندازه‌گیری میزان جریان رودخانه وجود دارند. برای بررسی دقیق روابط متقابل آبخوان و رودخانه در دشت، از بسته River استفاده شد. منحنی های هم‌عمق سطح آب زیرزمینی نشان داد که در ناحیه ورود دو سرشاخه به دشت، به‌علت پایین بودن سطح آب زیرزمینی و درشت بودن آبرفت رودخانه‌ای، مقداری از آب رودخانه به آبخوان نفوذ می‌کند و آبخوان را تغذیه می‌کند، اما در قسمت های خروجی دشت و در نزدیکی رودخانه سملقان سطح آب بسیار به سطح زمین نزدیک شده، به‌طوری که رودخانه به زهکش کننده آبخوان تبدیل می‌شود و دبی پایه رودخانه سملقان از زهکشی آبخوان و زمین های کشاورزی تأمین می شود. بازدیدهای میدانی و عمق کم سطح ایستابی در این نواحی تأیید کننده این موضوع است. نقشه پهنه بندی سطح آب زیرزمینی در آبخوان نشان داد که بیشترین افت ۱۰ ساله به میزان ۷/۹ متر و کمترین افت به مقدار ۰/۲ متر مشاهده می شود. به‌دلیل بهره‌برداری زیاد، افت سطح آب در اکثر نقاط دشت قابل مشاهده است. در شکل (۵) نحوه ارتباط آبخوان با رودخانه نشان داده شده است. طبق شکل مشاهده می‌شود که جهت جریان در آبخوان از سمت جنوب غرب



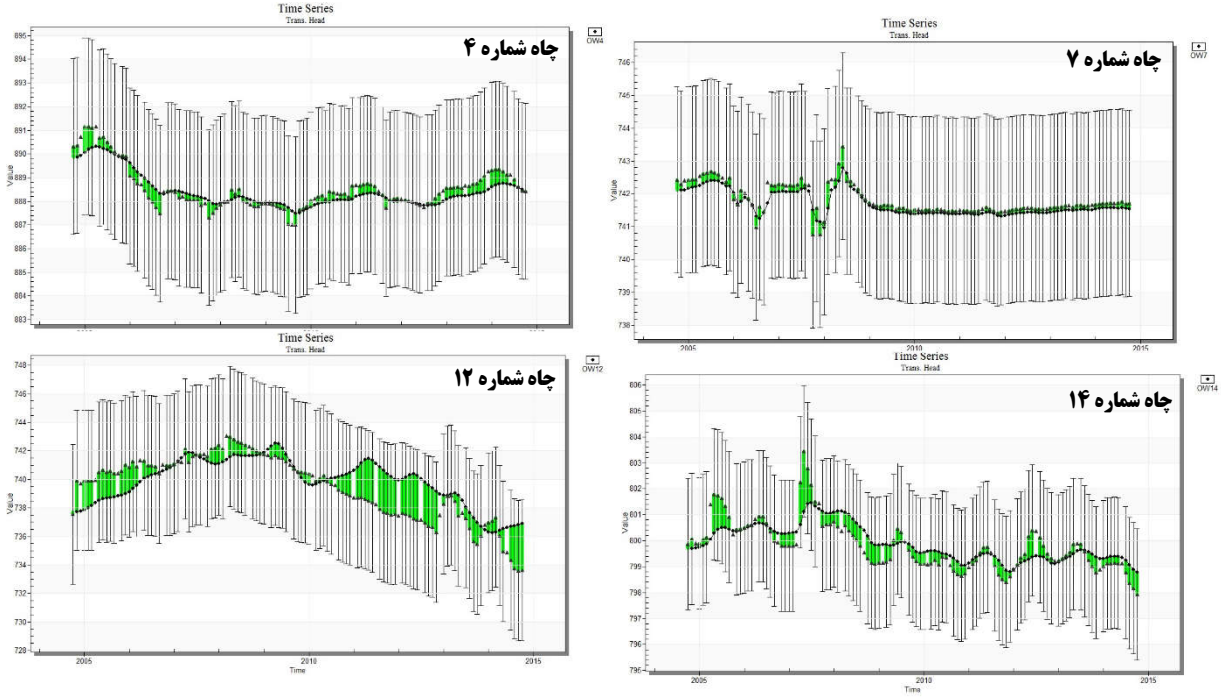
شکل ۵. ارتباط آبخوان و رودخانه در دشت سملقان

به شمال شرق است و مرزهای ورود جریان در محل اتصال رودخانه های درکش و شیرآباد به رودخانه سملقان هستند. بیشترین ارتفاع به میزان ۹۱۱ و کمترین ارتفاع به مقدار ۶۹۷ متر مشاهده شد.

نتایج و بحث

واسنجی مدل

در مدل سازی دشت سملقان، یک دوره ۸ ساله (۱۳۹۱-۱۳۸۳) به‌منظور واسنجی درنظر گرفته شد. گام‌های زمانی ۳۰ روزه و همچنین دوره های تنش نیز ماهانه درنظر گرفته شد. هدف از واسنجی مدل، سنجش حساسیت پارامترهای هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و تغذیه است. واسنجی در آبخوان‌ها باید بنا به شرایط حاکم صورت گیرد و از آنجایی که آبخوان‌های طبیعی بیشتر دارای شرایط ناماندگار هستند، واسنجی نیز باید در این حالت صورت گیرد. پس از واسنجی دستی و از طریق انجام سعی و خطا ، با استفاده از ابزار واسنجی اتوماتیک PEST مقادیر بهینه K و Sy به‌دست آمد (۶). با سنجش حساسیت مدل به مقادیری که این پارامترها اختیار کردند، این نتیجه حاصل شد که مدل به مقادیر هدایت هیدرولیکی واکنش بیشتری نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تغذیه هم از لحاظ اهمیت در مرحله بعدی قرار داشت و مقادیر این پارامتر هم نقش تعیین کننده‌ای در نتایج مدل دارد. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی در مناطق شمال شرقی و جنوب غربی آبخوان وجود دارد، درحالی که در مرکز آبخوان از مقدار هدایت هیدرولیکی کاسته شده که این تغییرات متناسب با تغییر دانه‌بندی ذرات آبخوان بوده که در لاگ های حفاری نیز قابل مشاهده است. مقادیر هدایت هیدرولیکی آبخوان از ۰/۰۷۸ تا ۱۴/۹۷ متر در روز متغیر است. تغییرات آبدهی ویژه نیز روندی مشابه هدایت هیدرولیکی داشته که متناسب با تغییر دانه‌بندی ذرات آبخوان است. مقادیر آبدهی ویژه آبخوان از ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۴۴ متغیر است. روند تغییرات سطح آب مدل سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای در دوره واسنجی مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشان داد که تطابق خوبی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی وجود دارد، به‌طوری که در اکثر نقاط میزان خطا کم بوده و مدل به‌خوبی توانسته است شرایط طبیعی آبخوان را شبیه سازی کند. نتایج نشان داد که واریانس بین داده‌های مشاهداتی و



شکل ۶. مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی در مقابل خطای شبیه‌سازی (▲ تراز مشاهداتی، ● تراز محاسباتی)

محاسباتی کم بوده و حداکثر اختلاف در پیزومتر شماره ۶ و حداقل آن در پیزومتر شماره ۱۶ است که مؤید آن است که مدل به‌خوبی واسنجی شده و داده های ورودی مدل از دقت مناسبی برخوردار بوده‌اند. همچنین مشاهده شد در برخی نواحی دشت به‌واسطه نفوذ در اثر آب برگشتی کشاورزی، افزایش سطح آب و در برخی نقاط افت سطح آب زیرزمینی به‌علت برداشت‌های بی‌رویه مشاهده می‌شود.

صحت‌سنجی مدل

در مرحله صحت‌سنجی از داده‌های آبخوان در یک دوره زمانی غیر از دوره واسنجی استفاده می شود و صحت عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تغییر مقادیر K و S_y در این مرحله مجاز نیست (۱). برای اطمینان از مدل ساخته شده در آبخوان سملقان لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز برای ۲۴ ماه (۱۳۹۳-۱۳۹۱)، به مدل وارد شد. شکل (۶) مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی را برای چند چاه مشاهده ای در آبخوان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان خطا در دوره واسنجی و صحت سنجی پایین بوده و میزان همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده زیاد است، در واقع مدل واسنجی شده به‌خوبی توانسته شرایط حاکم بر آبخوان را شبیه سازی کند. درنتیجه می‌توان از آن برای پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی در آینده استفاده کرد و با تعریف شرایط مرزی مختلف تغذیه و برداشت، نتایج حاصل از اعمال گزینه های مدیریتی گوناگون را بررسی کرد. جدول (۱) معیارهای عملکرد مدل در شرایط واسنجی و صحت‌سنجی را نشان می‌دهد.

مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی در آبخوان سملقان

سفره آب زیرزمینی مانند منبعی بوده که به طرق مختلف و از منابع گوناگون آب به آن وارد و خارج شده که آب های ورودی را تغذیه و آب‌های خروجی را تخلیه می‌نامند. مجموع باران، برف ذوب شده و آب آبیاری کشاورزی، رواناب سطحی یا نفوذ را تشکیل می‌دهند. کل رواناب سطحی تولید شده برحسب شرایط می‌تواند به مخازن یا آبگیرها، آبخوان‌ها و یا جریان رودخانه بپیوندد. درصورت وجود آبگیر یا سد، قسمتی از

جدول ۱. معیارهای عملکرد مدل در شرایط واسنجی و صحت‌سنجی

ضرایب	دوره واسنجی **(Calibration)** (۱۳۸۳-۱۳۹۱)	دوره صحت‌سنجی **(Validation)** (۱۳۹۱-۱۳۹۳)
ریشه میانگین مربعات خطا (**RMSE**) (متر)	۱/۸۱	۱/۹۷
ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد شده (متر)**(NRMSE)**	۱/۱	۱/۲
ضریب هبستگی**(R^2)**	۰/۹۹۹۳	۰/۹۹۸۲

رواناب سطحی به این مخازن وارد می‌شود. آب وارد شده به این مخازن صرف آبیاری، تبخیر و تعرق و نفوذ به آبخوان‌های آب زیرزمینی می‌شود. آب مازاد بر حجم مخزن نیز به جریان‌های رودخانه در پایین‌دست می‌پیوندد. بخشی از رواناب سطحی که به آبراهه‌های فرعی می‌رسد، بسته به مقدار هدایت هیدرولیکی مؤثر از طریق بستر رودخانه‌های غیردائمی و یا فصلی به هدر می‌رود. آب منتقل شده از این طریق به سفره‌های آب زیرزمینی وارد می‌شوند. سایر جریان‌های سطحی مستقیماً وارد رودخانه‌ها خواهند شد. قسمتی از آب مصرفی مصارف کشاورزی، شهری و صنعتی به طرق مختلف به داخل زمین نفوذ کرده و وارد سفره آب زیرزمینی می شود. مقدار آبی که برای آبیاری مصرف می‌شود، در طول مسیر در اثر نیروی ثقل به داخل زمین نفوذ کرده و از منطقه ریشه گیاهان گذشته و به سفره آب زیرزمینی می‌پیوندد که آن را آب برگشتی به آبخوان می‌نامند. بر پایه مطالعات انجام گرفته در تهیه مدل مفهومی آبخوان سملقان، منابع اصلی تغذیه و تخلیه کننده این آبخوان عبارتند از: نفوذ به سفره آب زیرزمینی حاصل از بارش، جریان ورودی زیرزمینی، نفوذ به سفره از طریق جریانات سطحی و آب برگشتی مصارف گوناگون، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و زهکشی آبخوان توسط رودخانه، و چشمه. بدون شناخت مؤلفه‌های بیلان آب برنامه‌ریزی در زمینهٔ مسائل آبی، تعیین میزان منابع تجدید پذیر و تخصیص این منابع با مشکل مواجه خواهد شد. تعیین بیلان آبی دشت‌ها و حوضه‌های کشور می‌تواند برای مدیریت و برنامه‌ریزی‌های منابع آب کمک فراوانی کند. نکته قابل توجه آنکه بیلان آب در سطح یک حوضه فرایند پیچیده ای است که باید به‌صورت کامل و جامع بررسی شود چرا که پارامترهای ورودی و خروجی زیادی وجود دارد که تعیین همه جانبه بیلان آب را با پیچیدگی همراه می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد که برداشت بی‌رویه از چاه‌های بهره‌برداری باعث کاهش سطح سفره آب زیرزمینی در دشت سملقان شده است. با توجه به کاهش بارش و خشکسالی های اخیر سطح کشت دیم در منطقه کاهش و کشاورزان به کشت آبی و استفاده از چاه ها روی آورده‌اند که می تواند منجر به تشدید بحران آبی در دشت و افت شدید سفره شود. جدول (۲) مقادیر سالانه پارامترهای بیلان آب زیرزمینی آبخوان را نشان می‌دهد. بررسی اجزای بیلان نمایان می سازد که جریان ورودی از مرزها و جریان‌های سطحی بیشترین نقش را در تغذیه آبخوان سملقان ایفا می کنند. درحالی که برداشت از منابع زیرزمینی مهم ترین عامل تخلیه کننده آبخوان است و به‌دلیل بیشتر بودن برداشت از تغذیه در درازمدت، کسری مخزن به اندازه ۹۱/۴ میلیون مترمکعب در طی ۱۰ سال (به‌طور میانگین ۹/۱۴ میلیون مترمکعب در هر سال) مشاهده می‌شود. از نکات قابل توجه دیگر وابستگی زیاد تغییرات حجم ذخیره آبخوان به بارش های جوی است. به‌طوری که در سال‌هایی که بارش بیشتر از میانگین بوده است، شاهد افزایش حجم ذخیره آبخوان بوده ایم. درنتیجه منابع آب این محدوده نسبت به خشکسالی و تغییرات اقلیمی، حساسیت زیادی دارند و آسیب‌پذیر هستند.

جدول ۲. اجزای بیلان آب زیرزمینی (میلیون مترمکعب)

مؤلفه‌های بیلان	جریان ورودی	جریان خروجی
ورودی از مرزها	۲۰/۵	
تغذیه از بستر رودخانه و چاه‌های فاضلاب	۵/۸	
تغذیه از جریان سطحی	۱۱/۶۴	
خروجی از مرزها		
تخلیه چاه، چشمه و زهکشی رودخانه		۰/۶۸
تغییرات حجم آبخوان		۴۶/۴
	-۹/۱۴	

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی آبخوان سملقان با استفاده از مدلMODFLOW با دقت مناسب صورت گرفت. برای شناسایی وضعیت تغذیه نیز مدل‌سازی توسط مدل آب سطحی SWAT انجام و مؤلفه های اصلی بیلان آب حوضه توسط مدل واسنجی شده مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل با مقادیر مشاهداتی در یک دوره ۱۰ ساله تطابق مناسبی دارد. هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای دشت حاکی از روند کاهشی سطح ایستابی است. درنهایت با توجه به مدل آب زیرزمینی توسعه یافته برای آبخوان آبرفتی سملقان، مقادیر مؤلفه های بیلان برآورد و حدود ۹/۱۴ میلیون مترمکعب کاهش را در طی دوره نشان داد که درصورت بهره برداری صحیح از منابع آب سطحی به‌عنوان منبع تغذیه آبخوان، می توان سطح آب زیرزمینی را افزایش داده و افت حاصل از برداشت های بی رویه از آبخوان را تا حدی جبران کرد. از طرفی افزایش زمین های کشاورزی در دشت نیز باعث افت سطح آب زیرزمینی شده است. به‌دلیل کمبود بارش و وقوع خشکسالی، اراضی دیم در منطقه کاهش و کشاورزان به کشت آبی و استفاده از آب چاه و قنات روی آورده‌اند که می تواند افت شدید سفره را به‌دنبال داشته باشد. مهم‌ترین نگرانی در روش مدل‌سازی، سرمایه‌گذاری اولیه آن نسبت به سایر روش‌های تعیین بیلان است. ذکر این نکته ضروری است که در حال حاضر تعیین بیلان هر ساله انجام می شود و برای آن نیز هزینه زیادی صورت می‌گیرد و چنین هزینه‌ای هر سال به‌صورت مداوم صرف چنین مطالعاتی می‌شود. از آنجایی که چنین مطالعاتی استاتیک بوده و فقط برای آن سال انجام می پذیرد نمی توان از آن برای پیش‌بینی آینده و سناریوهای مدیریتی استفاده کرد. درحالی که مدل سازی هر چند دارای هزینه اولیه بیشتری است، ولی از مدل توسعه یافته می‌توان به‌منظورهای پیش‌بینی و مدیریتی استفاده کرد.

منابع مورد استفاده

1. Anderson, M., W. Woessner and R. Hunt. 1992. Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. Academic Press Inc., San Diego, CA. *Journal of Hydrology* 140: 393-395.
2. Arnold, J. G., D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. van Harmel, A. Van Griensven, M. W. Van Liew and N. Kannan. 2012. Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4): 1491-1508.
3. Bear, J. and A. H. -D Cheng. 2010. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport, Theory and Applications of Transport in porous Media 23, Springer Science Business Media.

4. Chakraborty, S., P. K. Maity and S. Das. 2020. Investigation, simulation, identification, and prediction of groundwater levels in coastal areas of Purba Midnapur, India, using MODFLOW. *Environ Dev Sustain* 22: 3805-3837.
5. Daloglu, M., J. I. Nassauer, R. Riolo and D. Scavia. 2014. An integrated social and ecological modeling framework impacts of agricultural conservation practices on water quality. *Ecology and Society* 19(3): 1-12.
6. GMS 10.4 Tutorial: MODFLOW-Automated Parameter Estimation; Aquaveo: Provo, Utah, UT, USA, 2018.
7. Hashemi Nezhad, H. and A. Karimi Jashni. 2006. Investigation of groundwater quality loss in hydrological units of Najafabad and Isfahan-Borkhar during the year of 1997-2004. The First Regional Conference on Optimal Use of Water Resources of Karoon and Zayandehrud Basins, Sharekord University. (In Farsi).
8. Krause, S., A. Bronstert and E. Zehe. 2007. Groundwater-surface water interactions in a North German lowland floodplain-implications for the river discharge dynamics and riparian water balance. *Journal of Hydrology* 347(3-4): 404-417.
9. McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. US Geological Survey. Open File Report.
10. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R. Williams. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
11. Pholkern, K., P. Saraphirom, V. Cloutier and K. Srisuk. 2019. Use of alternative hydrogeological conceptual models to assess the potential impact of climate change on groundwater sustainable yield in central huai luang basin, Northeast Thailand. *Water* 11(2): 241.
12. Qiu, S., X. Liang, C. Xiao. H. Huang, Z. Fang and F. Lv. 2015. Numerical simulation of groundwater flow in a river valley basin in Jilin urban area, china. *Water* 7(10): 5768-5787.
13. Safavi, H. R. and G. R. Bahreini. 2009. Conjunctive simulation of surface water and ground water resources under uncertainty. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B- Engineering* 33(B1): 79-94.
14. Sophocleous, M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal* 10(1): 52-67.
15. Thangarajan, M. G. 2007. Groundwater Flow and Mass Transport. Modeling: Theory and Application, Capital Publishing Company. New Delhi, India. ISBN 9788185589619.
16. Ziaei, A. N. and A. J. M. Mohammadi. 2016. The study of the impact ofwater conveyed from Maneh Basin on Bojnourd Aquifer by using GMS model. *International Bulletion of Water Resources & Development* 1(13): 205-217.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 25, No. 3, Fall 2021, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Analysis of Groundwater Balance of Samalqan Plain Aquifer Using SWAT and MODFLOW Models

Sh. Nasiri, H. Ansari* and A. N. Ziaei[1]

(Received: July 10-2020; Accepted: December 1-2020)

Abstract

Reducing surface water resources and successive droughts and consequently excessive use of groundwater resources, especially for agricultural purposes, have caused irreparable damage to the natural resources of the country. In the meantime, knowing the status of the water balance of the plain can help to effective management of water resources in the region. Samalqan plain is located in a semi-arid climate in North Khorasan Province. Since the surface water resources for water supply are not very reliable, so, the main source of water supply in the region is well. Due to the existence of rivers in the plain, the low thickness of the alluvium, groundwater level fluctuations, and the high uncertainty in the calculation of hydrodynamic coefficients, the need for careful hydrogeological studies and determining the role of each parameter affecting groundwater is necessary. This study was conducted to simulate the Samalqan aquifer and analysis of water balance for the years 2003 to 2013 using the MODFLOW model. To identify the groundwater recharge rate, this component was estimated by the SWAT model. Calibration and validation of the model with an error of 1.1% and 1.2%, respectively, indicated that an appropriate estimation between the simulated and observed heads. Assessment of the groundwater hydrograph in the observation wells showed that the groundwater level in most places has many monthly and seasonal fluctuations. After drawing the potential lines of the plain, the inputs and outputs were identified, and using the reserve volume changes, the water balance was determined. The results showed that the water balance of the plain was negative and the reservoir deficit was estimated at 9.14 million cubic meters. Therefore, this model can be used to predict the future situation of aquifer and the management of *water resources* in the region.

Keywords: Groundwater level, Recharge, Water balance, River-aquifer interaction, SWAT, MODFLOW

1. Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
*: Corresponding author, Email: ansary@um.ac.ir