نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و ششم / شماره سوم / پاییز ۱۴۰۱ / مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱۹۳ تا ۲۰۹

مدل‌سازی آبخوان ملایر توسط مدل آب‌های زیرزمینی MODFLOW و مدل شبیه‌سازی آب سطحی SWAT

گل‌مهر صمدی*، سید فرهاد موسوی و حجت کرمی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۹)

چکیده

با استفاده از ابزارهای گوناگون از جمله مدل‌های ریاضی، می‌توان با حداقل هزینه و زمان، تأثیر گزینه‌های مختلف مدیریتی را بر منابع آب یک منطقه و شرایط موجود ارزیابی و کاربردی‌ترین مورد را انتخاب کرد. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیک و هیدرومتری در حوضه آبریز ملایر، مدل هیدرولوژیک SWAT در بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۳۸۸ اجرا و صحت‌سنجی مدل نهایی توسط SWAT-CUP انجام شد. در راستای کاهش میزان عدم قطعیت در پارامترهای ورودی به مدل MODFLOW، با استفاده از مقدار تغذیه سطحی حاصل از اجرای مدل SWAT، مدل‌سازی کمّی آبخوان ملایر در نرم‌افزار GMS توسط مدل MODFLOW با اطمینان بیشتری انجام شد. پس از شبیه‌سازی آبخوان ملایر در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۸ و صحت‌سنجی آن در سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷، مقادیر میانگین خطای مطلق (MAE) بین ۰/۳۵ تا ۰/۶۵ متر و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) بین ۰/۶۲ تا ۰/۹۴ متر به‌دست آمد که با توجه به حدود سطوح آب محاسباتی و مشاهداتی برابر با ۱۶۵۰متر، قابل قبول به نظر می‌رسد. نتایج تغییرات سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای واقع در منطقه ملایر حاکی از آن است که تراز سطح آب زیرزمینی در محدوده آبخوان در دوره مطالعاتی ۱۰ ساله به‌طور میانگین ۹/۷ متر کاهش داشته است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی کمّی، آبخوان ملایر، آب زیرزمینی، GMS، MODFLOW، SWAT

۱. گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: samadi.golmehr@semnan.ac.ir

مقدمه

کشور ایران با متوسط بارندگی سالانه ۲۵۰ میلی‌متر و قرار گرفتن بخش عمده‌ای از آن در منطقه خشک و نیمه‌خشک، از نظر منابع آب در وضعیت نامساعدی نسبت به متوسط دنیا قرار دارد. از طرفی، در سال‌های اخیر پدیده خشکسالی، عدم تعادل بین تقاضا و پتانسیل منابع آب موجود، الگوی نامناسب کشت و روش‌های آبیاری، کاهش شدید آب‌های سطحی در کشور و به دنبال آن افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی را در پی داشته است. بنابراین، آب‌های زیرزمینی به یکی از مهم‌ترین منابع در دسترس جهت تأمین آب مصرفی در بخش‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی، کشاورزی، صنعتی و شرب کشور تبدیل شده‌اند. از این‌رو، بهره‌برداری از ذخایر این منابع به شدت رو به فزونی گذاشته که در نتیجه باعث افت سطح ایستابی در نقاط مختلف شده است (۳). استان همدان از نواحی نیمه‌خشک کشور بوده که دارای میزان کمی منابع آب سطحی است. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از آب مورد نیاز کشاورزی و مصارف شهری این منطقه از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود، آبخوان‌های این استان با چالش‌های جدی نظیر افت تراز آب، کاهش میزان تغذیه به سبب نقصان بارندگی و آلاینده‌های طبیعی و یا ناشی فعالیت‌های انسانی روبه‌رو است. یکی از آبخوان‌های استان همدان، آبخوان ملایر است که در سال‌های اخیر، با افزایش میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی این آبخوان، تراز سطح آب زیرزمینی در این آبخوان روند کاهشی داشته است. بر اساس آمار و اطلاعات دریافتی از شرکت آب منطقه‌ای استان همدان، مقادیر مصرف سالانه آب از آب‌های زیرزمینی (چاه و قنات) در محدوده آبخوان آبرفتی ملایر برابر با ۲۴۰/۳۵ میلیون متر مکعب و از آب‌های سطحی و چشمه‌ها برابر با ۶/۱۵ میلیون متر مکعب است که از این مقادیر، میزان مصرف آب در بخش‌های کشاورزی و شرب به‌ترتیب برابر با ۲۱۷/۶۰ میلیون متر مکعب و ۲۴/۸۰ میلیون متر مکعب بوده و مابقی به مصرف بخش صنعتی می‌رسد. مطالعات انجام شده حاکی از افت تراز سطح آب زیرزمینی در این آبخوان به میزان ۱۹/۵۹ متر در دوره زمانی ۱۷ ساله بوده است که بیانگر متوسط افت سالانه برابر با ۱/۱۵ متر در آبخوان ملایر است (۸). بنابراین، برای جلوگیری از ادامه افت کمی منابع آب زیرزمینی ناحیه مذکور، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی باید به‌عنوان یک اصل در برنامه‌ریزی‌های استانی این منطقه قرار گیرد. از سوی دیگر، منابع آب زیرزمینی که دور از دید مستقیم هستند و بررسی ماهیت کمّی و کیفی آنها امری پیچیده است، نسبت به منابع آب سطحی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۱۴). بنابراین، مدل‌سازی ریاضی آب‌های زیرزمینی به‌منظور شبیه‌سازی و بررسی ویژگی‌های این منابع، به‌عنوان ابزاری اساسی در جهت ارزیابی کمّی و کیفی و پیش‌بینی راهکارهای پیشنهادی محسوب می‌شود. در بیشتر مطالعات مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، درصدی از مقدار بارش را به‌عنوان پارامتر نفوذ در مدل MODFLOW لحاظ می‌کنند. روش مذکور، عدم قطعیت مدل را بالا برده و در نتیجه از صحت و دقت نتایج می کاهد. کوچک‌زاده و نصیری‌صالح (۱۰)، اقدام به ارزیابی دقت مدل‌سازی آبخوان دشت سیلاخور در صورت استفاده از خروجی شبیه‌سازی آب سطحی کرده‌اند. ایشان برای مقادیر پارامترهای تبخیر و تعرق (ET) و تغذیه در مدل آب زیرزمینی MODFLOW، یک‌بار از نتایج مدل آب سطحی SWAT استفاده کردند و بار دیگر با درنظرگیری درصدی از بارش منطقه به‌عنوان تغذیه و اطلاعات ایستگاه تبخیرسنجی سیلاخور برای تبخیر و تعرق، آبخوان مذکور را شبیه‌سازی کردند. دولت‌آبادی و زمردیان (۴)، به برآورد مقادیر تغذیه آبخوان حوضه فیروزآباد با استفاده از SWAT و بهره‌گیری از آن در مدل MODFLOW در نرم‌افزار PMWIN پرداختند. کمالی و نیک‌سخن (۷)، در پژوهشی برای محدوده مطالعاتی اصفهان- برخوار، از خروجی حاصل از مدل SWAT به‌عنوان ورودی مدل MODFLOW استفاده کردند و سپس خروجی مدل MODFLOW وارد مدل MT3DMS شد. چون و همکاران (۲) با استفاده از مدل ترکیبی GW-SW شرایط هیدروژئولوژیک و اثرات تغییر اقلیم و برداشت آب‌های

زیرزمینی را بر تعاملات جریان آب سطحی- زیرزمینی در غرب کانادا مورد بررسی قرار دادند. گائو و همکاران (۵) منابع آب سطحی در رودخانه سان‌فلاور آمریکا را در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۶ توسط مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW مورد ارزیابی قرار دادند. موزاس و همکاران (۱۲) از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW جهت بررسی توزیع مکانی تغذیه آبخوان به صورت سالانه و فصلی و همچنین تعاملات بین جریان‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی در حوضه آبریز لیمپوپو استفاده کردند. وی و همکاران (۱۵) با استفاده از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW-RT3D، انتقال نیترات بین جریان آب‌های سطحی و آب زیرزمینی و غلظت آن در آبخوان را در محدوده مطالعاتی اسپراگوئه در محدوده زمانی ۲۰۰۳-۱۹۷۰ شبیه‌سازی کردند. نائب‌فاروجی و همکاران (۱۳) برای برآورد تبادلات بین آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز شازند در دوره ۲۰۱۰-۱۹۹۸ از مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW بهره بردند. ییفرو و همکاران (۱۶) مطالعه‌ای در راستای بررسی تغییرات زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی در چند حوضه آبریز با استفاده از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW انجام دادند. نوروزی خطیری و همکاران (۹)، برای برآورد میزان تغذیه و تخلیه آبخوانی در اصفهان، از مدل MODFLOW و برای شبیه‌سازی کیفی آبخوان، از مدل انتقال آلودگی MT3DMS با بهره‌گیری از مدل هیدرولوژیک SWAT استفاده کردند. بررسی نتایج حاصل از پژوهش‌های مذکور بیانگر این نکته است که استفاده همزمان از دو مدل SWAT و MODFLOW با درنظر گرفتن تعامل بین جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی برای شناخت شرایط هیدرولوژیک در یک منطقه به خوبی قادر است نقایص مرتبط با محدودیت‌های نیمه‌توزیعی و توزیعی‌بودن دو مدل را پوشش دهد. در بیشتر این مطالعات، تمرکز اصلی بر استخراج مقدار خروجی متغیر تغذیه از SWAT و استفاده از آن به‌عنوان ورودی مدل MODFLOW به‌منظور تلاش در راستای افزایش دقت در شبیه‌سازی‌ها بوده است.

مقدار نفوذ از بارش در مدل MODFLOW نامعلوم است که برای تخمین آن اغلب درصدی از بارش در نظر گرفته می‌شود که این کار باعث کاهش دقت نتایج می‌شود. از سوی دیگر، مقادیر معینی برای تغذیه سطحی آبخوان‌ها ناشی از آبیاری کشاورزی و آب برگشتی مصارف کشاورزی، شرب و صنعت به آبخوان در طول چندین سال متمادی، در دسترس نیست. بنابراین، در این پژوهش با رویکرد مدل‌سازی ترکیبی آب‌های سطحی و زیرزمینی و با هدف کاهش منابع عدم قطعیت در مدل MODFLOW، از مقدار تغذیه سطحی حاصل از مدل SWAT، به عنوان یکی از کمیت‌های اصلی شرایط مرزی در مدل‌سازی آبخوان استفاده شده و این کمیت مورد واسنجی مدل آب زیرزمینی قرار نگرفته است. افزایش اطمینان‌پذیری ورودی‌های مدل MODFLOW با استفاده از این روش، می تواند در افزایش دقت و صحت شبیه‌سازی آبخوان بسیار مؤثر و کارا باشد. در این مطالعه، روش مذکور برای نخستین بار در آبخوان دشت ملایر مورد استفاده قرار است.

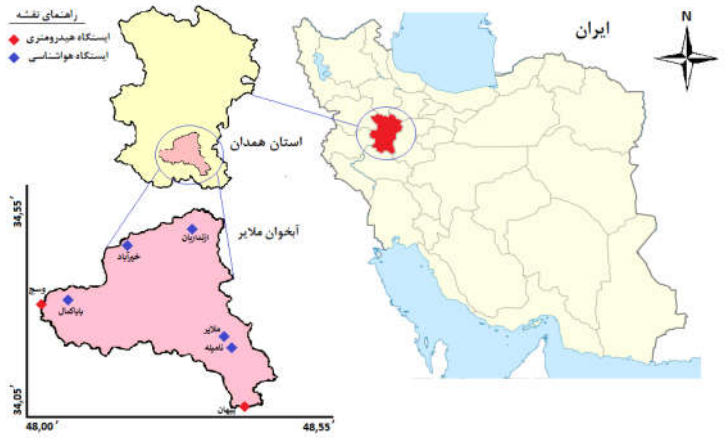
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، بخشی از منطقه ملایر واقع در استان همدان است که بین عرض‌های '۰۵ °۳۴ و '۳۶ °۳۴ شمالی و طول‌های ' ۲۰ °۴۸ و ' ۰۶ °۴۹ شرقی قرار دارد. وسعت محدوده مطالعاتی برابر با ۲۱۳۴/۱ کیلومتر مربع است که مساحت آبخوان در این محدوده برابر با ۱۱۱۷/۴ کیلومتر مربع بوده و ارتفاعات مشرف بر دشت وسعتی برابر با ۱۰۱۶/۷ کیلومتر مربع دارند. موقعیت آبخوان ملایر در شکل ۱ نشان داده شده است.

مدل SWAT

مدل SWAT مدلی نیمه‌توزیعی، مفهومی و فیزیکی بوده و در گام‌های زمانی ساعتی، روزانه و یا سالانه قابل اجرا است. این مدل، توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده آمریکا



شکل ۱. موقعیت آبخوان ملایر در استان همدان و کشور ایران

با هدف ارزیابی اثرات سناریوهای مدیریتی مختلف بر آب، رسوب، آفت‌کش‌ها و چرخه عناصر غذایی در حوضه‌های فاقد آماربرداری منظم ارائه شده است. در مدل SWAT ابتدا هر حوضه به تعدادی زیرحوضه و سپس بر اساس کاربری اراضی، خصوصیات خاک و توپوگرافی به چندین واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) تقسیم‌بندی می‌شود. متغیرهایی مانند آب موجود در خاک، رواناب، رسوب، انتقال عناصر غذایی و روش‌های مدیریتی برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیک و در نهایت برای هر زیرحوضه با استفاده از متوسط‌گیری وزنی برآورد می‌شود (۱).

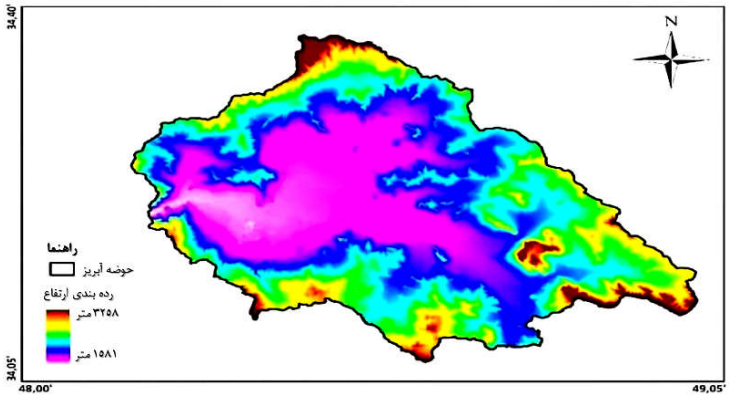
مدل MODFLOW

مدل MODFLOW توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) تهیه شده و قادر به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به صورت سه‌بعدی در یک محیط متخلخل با روش تفاضل محدود و همچنین تجزیه و تحلیل در حالات پایدار و ناپایدار است. این مدل قادر به شبیه‌سازی جریان در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار است (۶). با توجه به حالت خطوط جریان نسبت به خطوط مرزی در نقشه‌های خطوط هم‌عمق آب زیرزمینی، شرایط مرزی آبخوان در سه حالت مرز با شدت جریان مشخص، مرز بدون جریان و شرایط مرزی ترکیبی در این مدل قابل تعریف است (۱۱).

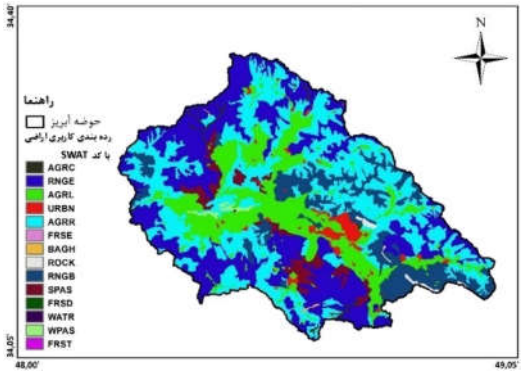
جمع‌آوری داده‌ها

مدل SWAT بسته به هدف مدل‌سازی، نیاز به آمار و اطلاعات جامعی شامل مدل رقومی ارتفاعی منطقه (DEM)، نقشه شبکه جریان، نقشه‌های کاربری اراضی، خاک، خصوصیات توپوگرافی حوضه آبریز، داده‌های هیدرومتری، اطلاعات منابع آب نقطه‌ای و زهکش‌ها، مخازن آب، اطلاعات مربوط به کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و همچنین داده‌های اقلیمی محدوده مورد مطالعه در مقیاس زمانی روزانه دارد. در این پژوهش، پردازش و آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز مدل SWAT2012 در محیط ArcGIS10.5 و توسط رابط ArcSWAT انجام شد. با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی محدوده مطالعاتی ملایر (شکل ۲) دریافتی از شرکت آب منطقه‌ای استان همدان با دقت ۳۰ متر، ترسیم حوضه آبریز و شبکه آبراهه‌ها توسط مدل SWAT انجام شد.

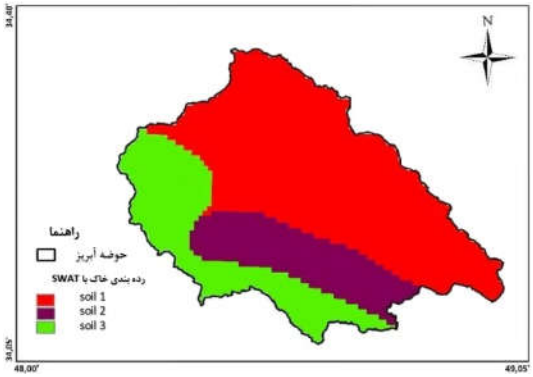
ArcSWAT برای تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها به واحدهای پاسخ هیدرولوژیک، از نقشه‌های رستری خاک، کاربری اراضی و طبقه‌بندی شیب منطقه استفاده می‌کند. در این مطالعه، از مقایسه نقشه‌های کاربری اراضی شرکت آب منطقه‌ای استان همدان و اراضی جهانی استفاده شده است (شکل ۳). انواع پروفیل‌های خاک در محدوده مطالعاتی ملایر با استفاده از نقشه خاک FAO تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا به مدل معرفی شد (شکل ۴). به‌منظور شبیه‌سازی این منطقه در بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۳۸۸، اطلاعات بارش، دما، باد، ساعات آفتابی و



شکل ۲. مدل رقومی ارتفاعی محدوده مطالعاتی ملایر (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۳. نقشه کاربری اراضی در محدوده مطالعاتی ملایر (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. انواع پروفیل‌های خاک در محدوده مطالعاتی ملایر (رنگی در نسخه الکترونیکی)

رطوبت نسبی در طول دوره آماری مذکور از ایستگاه‌های باران‌سنجی (دریافتی از شرکت آب منطقه‌ای استان همدان) و ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. مشخصات ایستگاه‌های مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور مدل‌سازی آبخوان توسط مدل MODFLOW، از اطلاعات دریافتی از شرکت آب‌منطقه‌ای استان همدان شامل موقعیت چاه‌های پیزومتر (شکل ۵) و چاه‌های مشاهده‌ای (شکل ۶) استفاده شد.

ضرایب هیدرودینامیک آبخوان با استفاده از آمار و اطلاعات آزمایش‌های ۹ چاه اکتشافی به‌دست آمد. سپس با استفاده از درون‌یابی توسط نرم‌افزار GIS، محدوده آبخوان ملایر به ۹ پلی‌گون تقسیم شد و به هر پلی‌گون یک مقدار هدایت هیدرولیکی اختصاص داده شد (شکل ۷). پس از درون‌یابی مقادیر آبدهی ویژه در نقاط مربوط به آزمایش پمپاژ در سطح آبخوان، نقشه ضریب آبدهی ویژه در شکل ۸ به‌دست آمد.

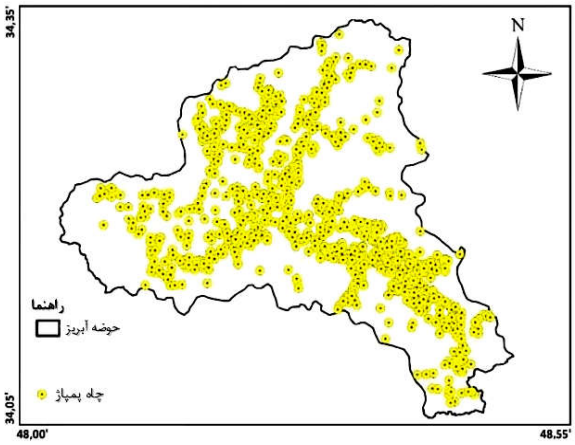
روش پژوهش

پس از اعمال تمامی اطلاعات حوضه آبریز ملایر، نسبت به اجرای مدل SWAT2012 در دوره زمانی ۱۳۹۸-۱۳۸۸ اقدام شد. سپس از نرم افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل در گام زمانی روزانه استفاده شد. عملیات واسنجی با استفاده از مقایسه مقادیر دبی حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر دبی مشاهداتی در دو ایستگاه هیدرومتری وسج و پیهان مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۲).

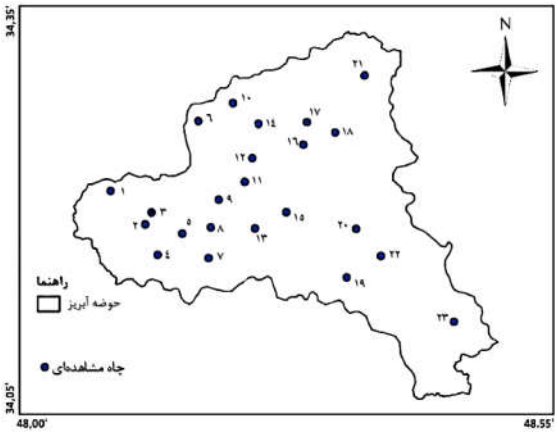
پس از تأیید صحت مدل شبیه‌سازی شده توسط SWAT، مقادیر تجمعی ماهانه تغذیه سطحی به داخل آبخوان در هر واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) منطبق بر آن، استخراج شد و

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی واقع در محدوده مطالعاتی ملایر

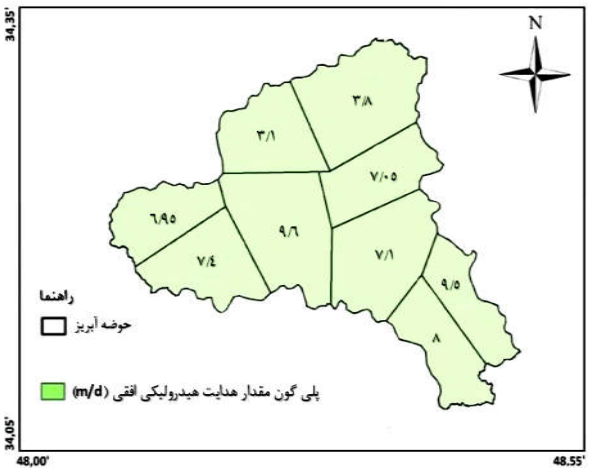
نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول	عرض	ارتفاع
خیرآباد	تبخیرسنجی	۴۸/۶	۳۴/۵	۱۷۷۰
نامیله	باران‌سنجی	۴۸/۸	۳۴/۳	۱۷۸۱
ازنداریان	باران‌سنجی	۴۸/۷	۳۴/۵	۱۸۱۰
بابا کمال	باران‌سنجی	۴۸/۴	۳۴/۳	۱۷۵۲
ملایر	سینوپتیک	۴۸/۸	۳۴/۳	۱۷۷۸



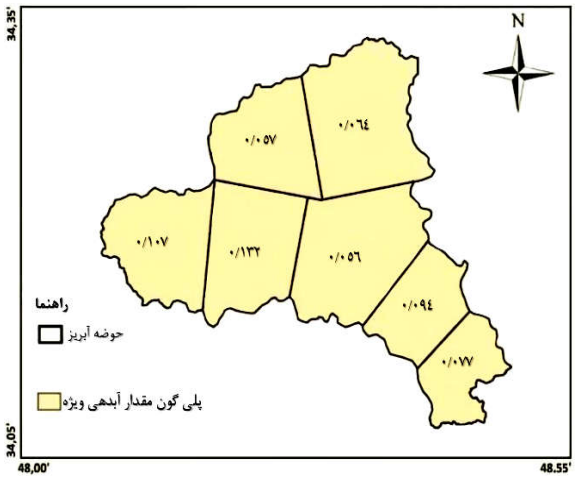
شکل ۵. موقعیت چاه‌های پمپاژ در محدوده آبخوان ملایر



شکل ۶. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در محدوده آبخوان ملایر



شکل ۷. نقشه پلی‌گون‌های هدایت هیدرولیکی افقی در دشت ملایر



شکل ۸. نقشه پلی‌گون‌های آبدهی ویژه در دشت ملایر

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و زیرحوضه‌های مربوطه در مدل

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت تحت پوشش (کیلومتر مربع)
پیهان	هیدرومتری	۴۸/۹	۳۴/۱	۴۹۷
وسج	هیدرومتری	۴۸/۵	۳۴/۴	۱۹۲

به مدل MODFLOW ارائه شد. پس از اعمال تمام داده‌های مورد نیاز مدل MODFLOW، مدل‌سازی حالت ماندگار برای سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ و سپس عملیات واسنجی این مرحله انجام شد. به این منظور، دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و هدایت هیدرولیکی غیرایزوتروپ به‌عنوان پارامترهای واسنجی تعیین شدند. شبیه‌سازی آبخوان ملایر در شرایط ناپایدار برای سال‌های آبی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ در ۱۰۸ گام زمانی (طول هر گام زمانی یک ماه در نظر گرفته شد) با در نظر گرفتن تمامی تنش‌های هیدرولوژیک (بارندگی، تبخیر، تغذیه، تخلیه و...) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مقدار خطایی که در نتایج خروجی حالت ناپایدار به‌دست آمد، جهت بهینه‌سازی پارامترها و در نتیجه خروجی دقیق‌تر، در گام چهارم واسنجی مدل انجام شد. در این گام پس از ۱۹ مرتبه اجرای مدل و کاهش خطا، پارامترهای مدنظر واسنجی در حالت ناپایدار (ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان) بهینه شدند و سپس به اجرای دوباره مدل در حالت ناپایدار پرداخته شد. درنهایت، صحت‌سنجی مدل در سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ برای چهار چاه مشاهده‌ای انتخاب شده انجام شد.

نتایج

واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT

پس از انجام واسنجی مدل شبیه‌سازی توسط مدل SWAT، مقادیر سه شاخص ارزیابی دقت شبیه‌سازی در این پژوهش شامل ضریب تبیین (R^2)، ضریب راندمان نش- ساتکلیف (NS) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای دو ایستگاه پیهان و وسج به‌دست آمد که به‌ترتیب در جداول ۳ و ۴ قابل مشاهده می‌باشد. نتایج حاصل از واسنجی مدل برای مقادیر دبی مشاهداتی در برابر دبی محاسباتی دو ایستگاه در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه گردیده است.

در این پژوهش، میزان حساسیت مدل به پارامترهای واسنجی با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 تعیین گردید و پس از آن، پارامترهای مورد واسنجی مشخص شدند. در انتها، پس از جایگزین کردن مقادیر جدید آنها به جای مقادیر اولیه و اجرای دوباره مدل SWAT، مقادیر تغذیه سطحی از نتایج خروجی نرم افزار SWAT به‌دست آمد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل MODFLOW

اولین گام پس از مدل‌سازی حالت پایدار توسط مدل MODFLOW، واسنجی مدل در حالت ماندگار است که نتایج آن برای ۲۳ چاه پیزومتری آبخوان ملایر مطابق شکل ۱۱ به‌دست آمد.

طبق شکل ۱۱، نتایج بصری تمامی پیزومترها قابل قبول بوده و رنگ تمامی شاخص‌ها به رنگ سبز درآمده است که بیانگر همخوانی این نتایج با معیارهای کلی نرم‌افزار برای محدوده خطای ۱ متر است. ناحیه قرمز رنگ در بخش غربی آبخوان، نشان‌دهنده سطح پایین آب زیرزمینی در این منطقه (بین ۱۶۲۰ تا ۱۶۳۸ متر) و در نتیجه تنش آبی بیشتر در این قسمت از آبخوان ملایر است. حال آن که هرچه به سمت شرقی آبخوان پیش رویم، تراز ایستابی آبخوان افزایش یافته و از تنش آبی کاسته می‌شود. مقادیر سطح آب زیرزمینی در پایان مرحله واسنجی دوره پایدار برای سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ به صورت شکل ۱۲ به‌دست آمد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می شود، نتایج انطباق قابل قبولی بر یکدیگر دارند که تأییدی بر دقت بالای شبیه‌سازی در حالت پایدار است.

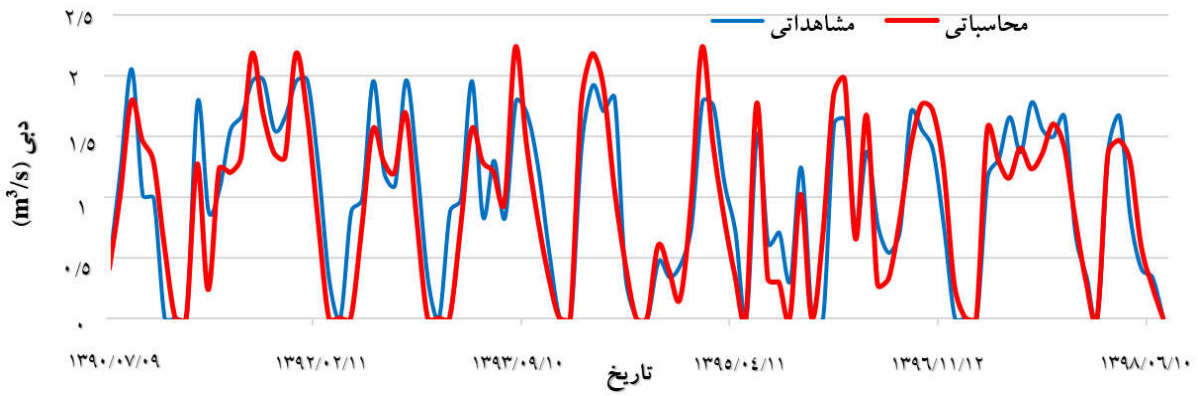
به‌منظور بررسی صحت نتایج واسنجی مدل در شرایط پایدار، از معیارهای ارزیابی خطای RMSE، ME و MAE استفاده شد که مقادیر آنها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. طبق شکل ۱۳ خطای میانگین (ME) در شرایط پایدار بین ۰/۱ تا ۰/۱۸ متر است که معیار مناسبی نیست. زیرا اختلاف میانگین‌های مثبت و منفی با هم جمع جبری شده و تأثیر یکدیگر را خنثی می‌کنند. از این‌رو، مقادیر کم ME به‌طور قطعی نشان‌دهنده یک واسنجی خوب نیست. از طرفی، مقادیر خطای میانگین مطلق (MAE) بین ۰/۶ تا ۰/۷ و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) بین ۰/۸ تا ۰/۹ متر است

جدول ۳. شاخص‌های دقت شبیه‌سازی دبی ماهانه برای ایستگاه پیهان

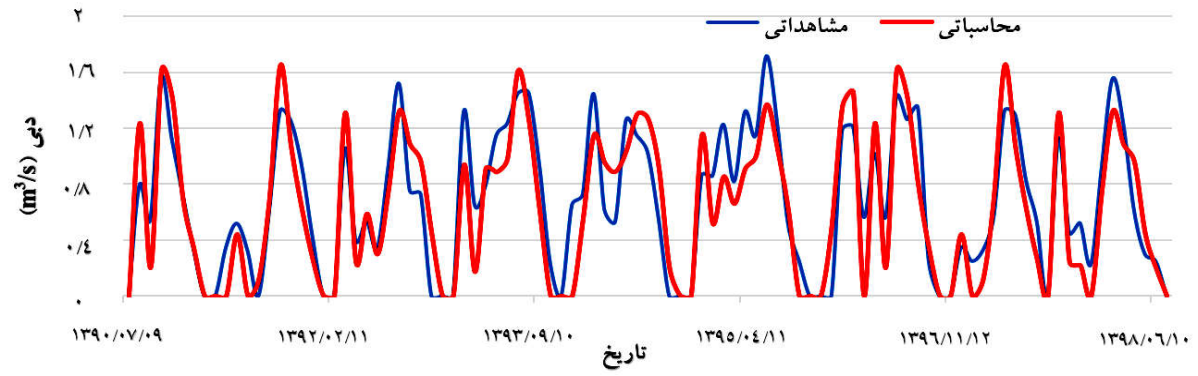
فرایند	دوره آماری	شاخص واسنجی				
		R^2	RMSE	NS	P-factor	r-factor
واسنجی	۱۳۹۰–۱۳۹۶	۰/۷۹	۱/۲۶	۰/۷۷	۰/۲۵	۰/۴۵
اعتبارسنجی	۱۳۹۶–۱۳۹۸	۰/۷۷	۱/۰۷	۰/۶۹	—	—

جدول ۴. شاخص‌های دقت شبیه‌سازی دبی ماهانه برای ایستگاه وسج

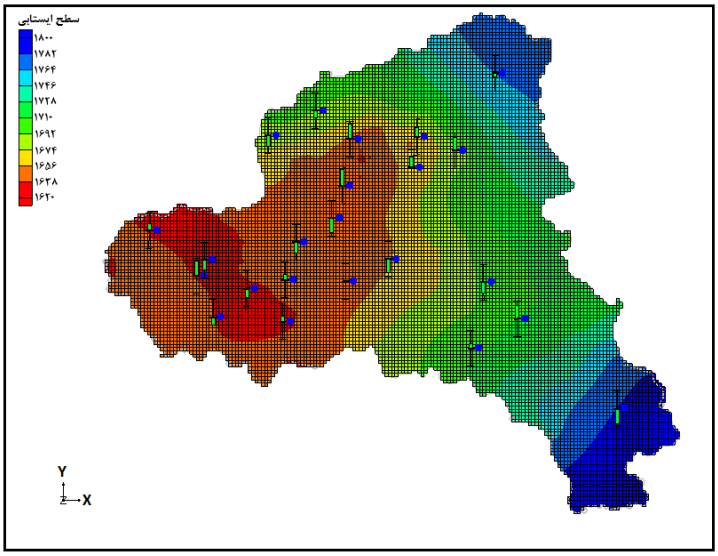
فرایند	دوره آماری	شاخص واسنجی				
		R^2	RMSE	NS	P-factor	r-factor
واسنجی	۱۳۹۰–۱۳۹۶	۰/۸۰	۲/۳	۰/۷۶	۰/۳۱	۰/۴۹
اعتبارسنجی	۱۳۹۶–۱۳۹۸	۰/۷۹	۲/۱	۰/۶۵	—	—



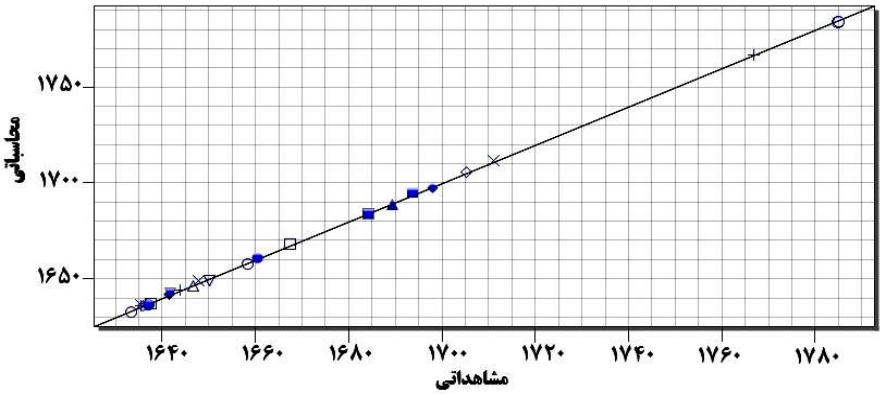
شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای رواناب ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل SWAT برای ایستگاه پیهان (رنگی در نسخه الکترونیکی)



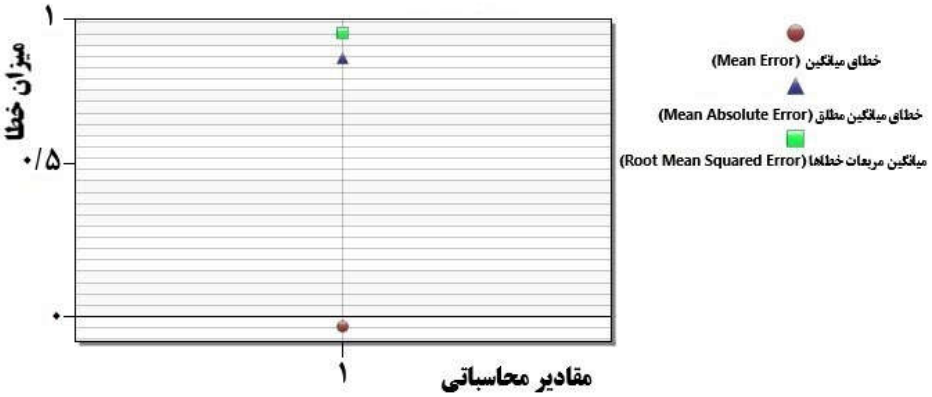
شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای رواناب ماهانه مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از مدل SWAT برای ایستگاه وسج (رنگی در نسخه الکترونیکی)



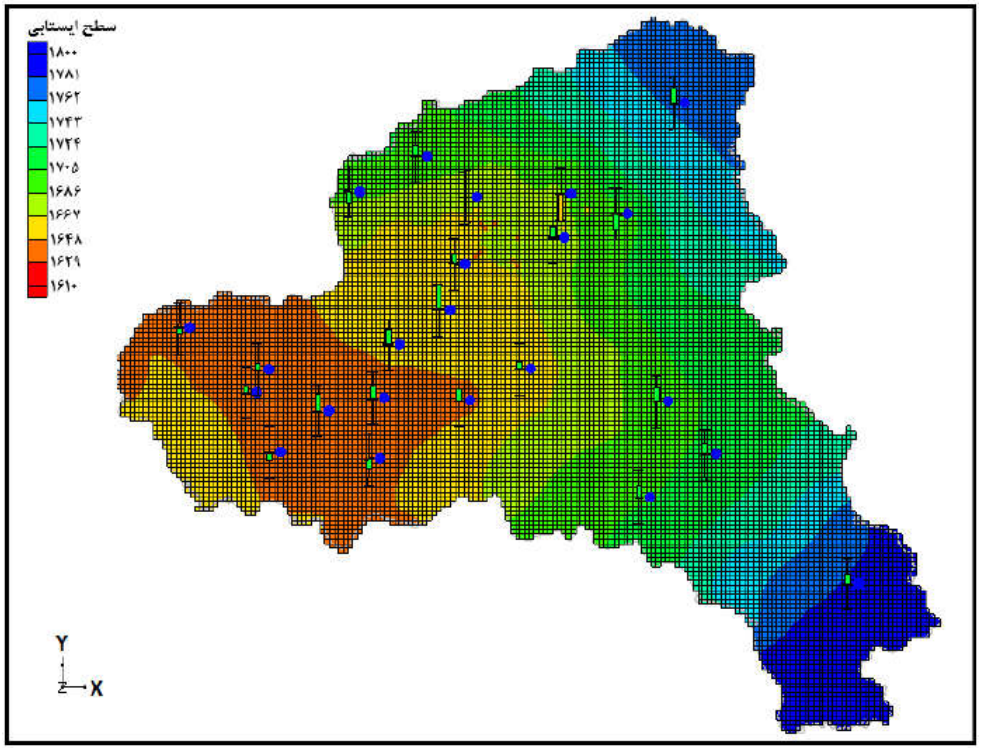
شکل ۱۱. نمایش خطای پیزومترها در مورد سطح ایستابی در پایان واسنجی حالت پایدار (رنگی در نسخه الکترونیکی)



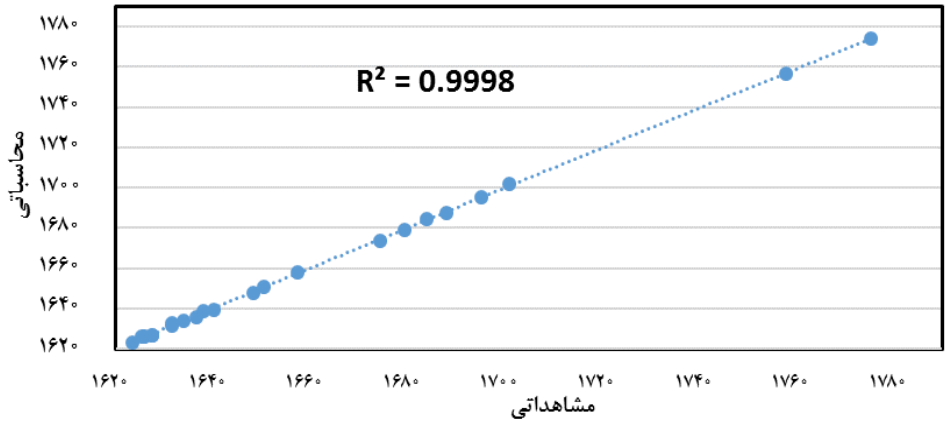
شکل ۱۲. مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بار هیدرولیکی برای ۲۳ چاه مشاهده‌ای در دوره واسنجی در حالت پایدار (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۳. مقادیر خطا برای ارزیابی نتایج محاسباتی و مشاهداتی سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۴. نتایج بصری شبیه‌سازی مدل در شرایط ناپایدار برای سال‌های آبی (۱۳۹۷-۱۳۸۹) با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده واسنجی مدل (رنگی در نسخه الکترونیکی)

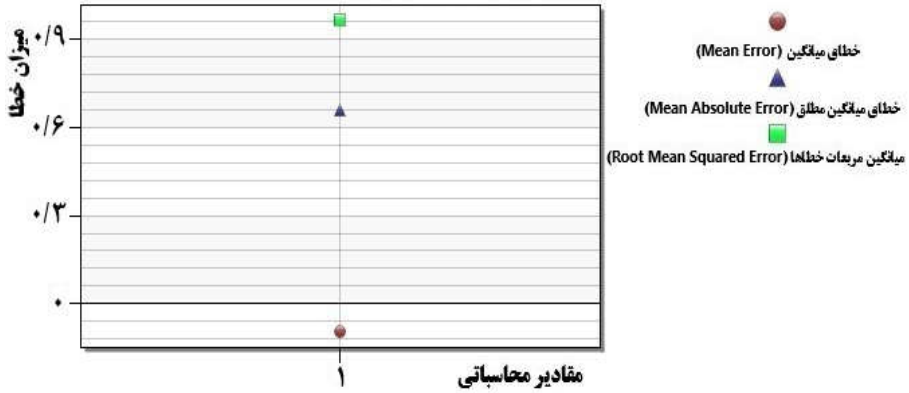


شکل ۱۵. مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بار هیدرولیکی در ۲۳ چاه مشاهده‌ای در انتهای دوره واسنجی حالت ناپایدار در سال آبی ۱۳۹۷

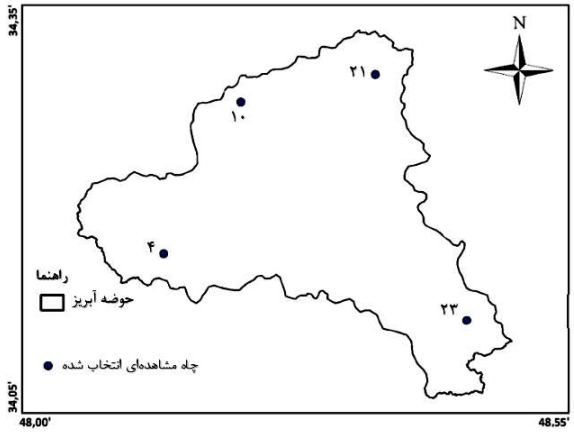
که با توجه به حدود هدهای محاسباتی و مشاهداتی برابر با ۱۶۵۰ متر قابل قبول به نظر می‌رسد.

در شکل ۱۴، نتایج نهایی پیزومترهای مدل به صورت بصری برای بعد از استفاده از پارامترهای بهینه واسنجی ارائه شده است. طبق این شکل، از ناحیه غربی آبخوان ملایر به سمت شرق آن، تراز ایستابی آبخوان افزایش می‌یابد و از تنش آبی کاسته می‌شود.

پس از مدل‌سازی منطقه در حالت ناماندگار و واسنجی آن، نتایج محاسباتی و مشاهداتی سطح آب زیرزمینی در پایان مرحله واسنجی دوره ناپایدار برای ۲۳ چاه پیزومتری در سال‌های آبی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ به صورت شکل ۱۵ به‌دست آمد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تبیین (R^2) برای



شکل ۱۶. مقادیر خطا برای ارزیابی نتایج محاسباتی و مشاهداتی چاه‌های مشاهده‌ای در شرایط ناپایدار (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۷. موقعیت چهار چاه مشاهده‌ای انتخاب شده جهت بررسی تغییرات سطح آب در دوره ناپایدار

داده‌های فوق نزدیک به ۱ بوده که نشان از همبستگی بالا و دقت خوب مدل در این شبیه‌سازی بوده است. برای بررسی صحت این نتایج، از معیارهای ارزیابی خطای RMSE، ME و MAE برای واسنجی مدل در شرایط ناپایدار استفاده شد (شکل ۱۶).

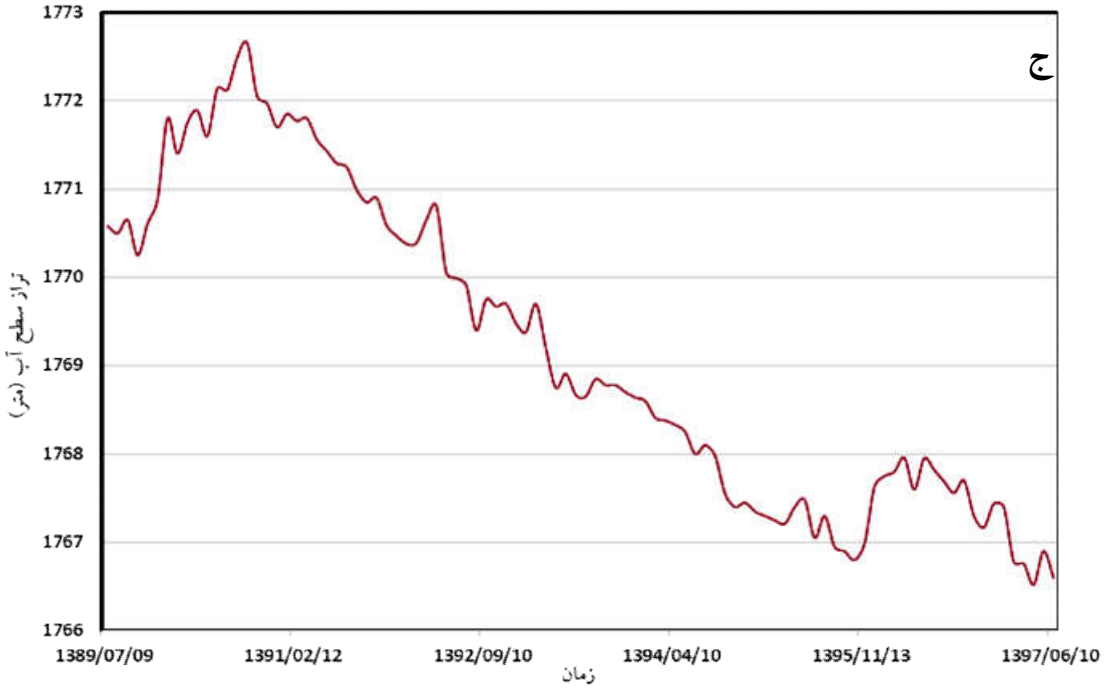
همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، خطای میانگین (ME) در شرایط ناپایدار بین ۰/۱۲ تا ۰/۱۸ متر است که معیار مناسبی نیست، زیرا اختلاف میانگین‌های مثبت و منفی با هم جمع جبری شده و تأثیر یکدیگر را خنثی می‌کنند. از این رو، مقدار کم ME به صورت قطعی نشان‌دهنده واسنجی خوب نیست. از طرفی، مقادیر میانگین خطای مطلق (MAE) بین ۰/۳۵ تا ۰/۵۵ متر و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) بین ۰/۶۲ تا ۰/۹۴ متر است که با توجه به حدود هدهای محاسباتی و مشاهداتی برابر با ۱۶۵۰متر، قابل قبول به نظر می‌رسد.

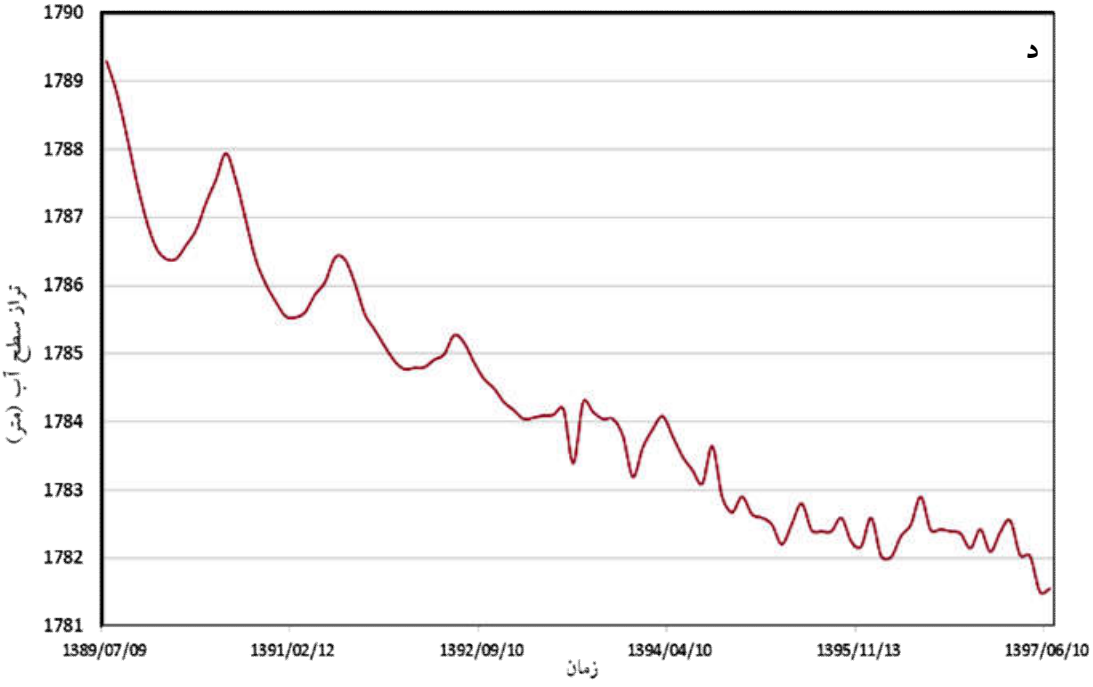
به‌منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی محدوده آبخوان ملایر، چهار حلقه چاه مشاهده‌ای با فواصل متفاوت از هم مدنظر قرار گرفته و تغییرات تراز سطح آب آنها از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت (شکل ۱۷).

شکل ۱۸ وضعیت تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی چهار چاه مذکور را به‌ترتیب در غرب، شمال، شرق و جنوب آبخوان ملایر نشان می‌دهد. در طول این مدت سطح آب وضعیت‌های مختلفی را تجربه کرده و تقریباً در هر چهار چاه پیزومتری در اکثر طول مدت مدل‌سازی ناپایدار (۱۳۸۹-۱۳۹۷)، تراز سطح آب روند نزولی داشته است. به‌طوری که در چاه پیزومتری شماره ۴ به‌طور میانگین ۱۲ متر و در چاه‌های شماره ۱۰، ۲۱ و ۲۳ به‌ترتیب به‌طور میانگین۷، ۶ و ۸ متر کاهش تراز سطح آب زیرزمینی را شاهد هستیم.

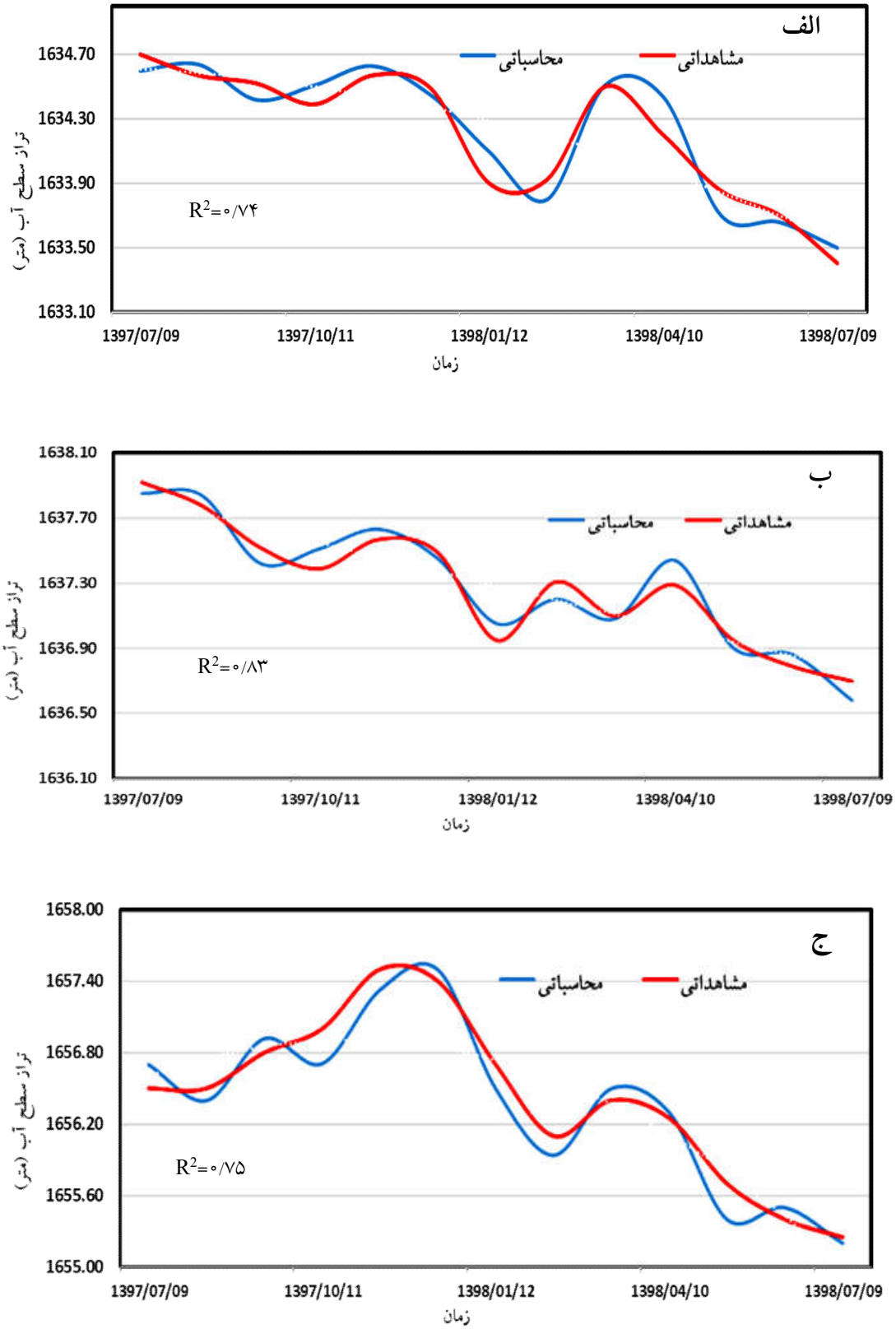
شکل ۱۸. تغییرات تراز سطح چاه‌های پیزومتری انتخابی در دوره ناپایدار (۱۳۹۷-۱۳۸۹)

الف) چاه شماره ۴، ب) چاه شماره ۱۰، ج) چاه شماره ۲۱ و د) چاه شماره ۲۳

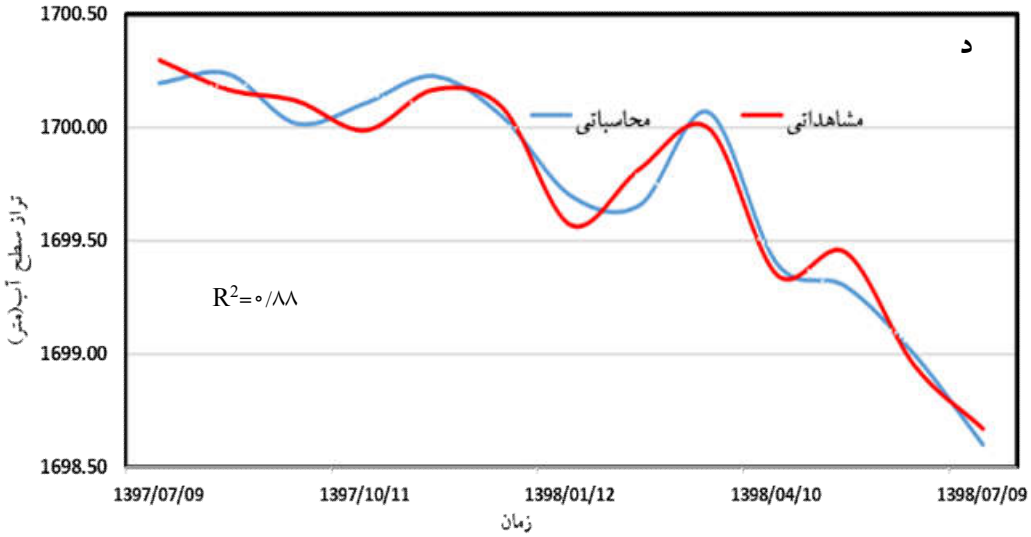

ج
تراز سطح آب (متر)
1773
1772
1771
1770
1769
1768
1767
1766
1389/07/09
1391/02/12
1392/09/10
1394/04/10
1395/11/13
1397/06/10
زمان


د
تراز سطح آب (متر)
1790
1789
1788
1787
1786
1785
1784
1783
1782
1781
1389/07/09
1391/02/12
1392/09/10
1394/04/10
1395/11/13
1397/06/10
زمان

ادامه شکل ۱۸



شکل ۱۹. مقادیر محاسباتی در مقابل مقادیر مشاهداتی بار هیدرولیکی در چاه‌های مشاهده‌ای در طول دوره صحت‌سنجی الف) چاه شماره ۵، ب) چاه شماره ۱۳، ج) چاه شماره ۱۴ و د) چاه شماره ۲۲ (رنگی در نسخه الکترونیکی)



ادامه شکل ۱۹

درنهایت، نتایج صحت‌سنجی مدل در سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ برای چهار چاه مشاهده‌ای انتخاب شده، در شکل ۱۹ نشان داده شده است. طبق شکل مذکور، مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی قرابت نزدیکی به هم دارند و مقدار ضریب تبیین (R^2) نزدیک به ۱ نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی و اعتبار نتایج آن است.

بحث و نتیجه‌گیری

در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، پارامتر تغذیه سطحی تأثیر عمده‌ای در نتایج خروجی شبیه‌سازی دارد. از طرفی، دسترسی کامل به اطلاعات دقیق و جامع پارامتر مذکور همواره امکان‌پذیر نیست. بنابراین، در این پژوهش با رویکرد افزایش اطمینان‌پذیری در شبیه‌سازی آبخوان ملایر، از مقادیرخروجی تغذیه سطحی مدل SWAT جهت بررسی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در منطقه مذکور در مدل MODFLOW استفاده شد. مقایسه نتایج رواناب حاصل از مدل واسنجی شده توسط روش SUFI2 با مقادیر مشاهداتی ثبت‌شده در دو ایستگاه هیدرومتری پیهان و وسج، نشان از انطباق مناسب این مدل بر منطقه دارد. نتایج حاصل از مدل SWAT بیانگر آن است که در محدوده مطالعاتی ملایر، پارامترهای مربوط به روش روندیابی و ویژگی‌های مسیل، از بیشترین اهمیت در مقادیر خروجی رواناب برخوردارند. نتایج تغییرات سطح آب در ۲۳ چاه مشاهده‌ای واقع در منطقه مورد مطالعه حاکی از آن است که تراز سطح آب زیرزمینی در محدوده آبخوان در دوره مطالعاتی ۱۰ ساله به‌طور میانگین ۹/۷ متر کاهش داشته و در قسمت‌های مرکزی و شمال شرقی آبخوان، سطح آب بعضی از چاه‌های مشاهده‌ای تغییرات بیشتری داشته است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که حساسیت مدل نسبت به پارامتر تغذیه سطحی حدود دو برابر پارامتر هدایت هیدرولیکی و پنج برابر پارامتر آبدهی ویژه است. میانگین خطای مطلق تراز آب مشاهداتی و محاسباتی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی توسط مدل MODFLOW و با استفاده از مقادیر خروجی مدل SWAT در ۲۳ چاه پیزومتری موجود در منطقه کمتر از ۰/۷ متر و مجذور میانگین خطاها در حدود ۱ متر به دست آمد. نتایج مذکور، نشان از دقت بالای مدل‌سازی انجام‌شده در آبخوان ملایر دارد.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعه زارع‌ابیانه و همکاران (۱۷) درباره سطح ایستابی آبخوان ملایر طی سال‌های ۱۳۶۸-۱۳۸۶، نشان از روند کاهشی تراز سطح آب زیرزمینی در این آبخوان از گذشته تا به حال دارد. با استفاده از روش‌هایی مانند تغییر الگوی کشت و به کارگیری شیوه‌های مدرن آبیاری زمین‌های کشاورزی، اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی، کنترل

بهره‌برداری از چاه‌های دارای پروانه با نصب کنتورهای هوشمند و جلوگیری از حفر و بهره‌برداری از چاه‌های غیرمجاز، می‌توان کاهش سطح آب زیرزمینی در آبخوان ملایر را تا حد زیادی کنترل کرد. همچنین، تخصیص آب سطحی به این منطقه در طول فصل تابستان، امکان برنامه‌ریزی آبی برای سطح بیشتری از حوضه آبریز ملایر را فراهم می‌کند.

منابع مورد استفاده

1. Besalatpour, A. A. and N. Hosseinzadeh. 2016. Theory and Tutorial of SWAT. Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran (In Farsi).
2. Chunn, D., M. Faramarzi, B. Smerdon and D. S. Alessi. 2019. Application of an integrated SWAT–MODFLOW model to evaluate potential impacts of climate change and water withdrawals on groundwater–surface water interactions in West-Central Alberta. *Water* 11(1): 110.
3. Dowlatabadi, S. 2012. Conjunctive simulation of surface water and groundwater using SWAT and MODFLOW in Firoozabad watershed. Master thesis, Shiraz University, Shiraz, I.R. Iran (In Farsi).
4. Dowlatabadi, S. and S. M. A. Zomorodian. 2015. Utilization of recharge values derived from SWAT model in mathematical model of MODFLOW to simulate groundwater flow of Firoozabad Plain. *Journal of Water and Soil Science* 19(71): 337-348.
5. Gao, F., G. Feng, M. Han, P. Dash, J. Jenkins and C. Liu. 2019. Assessment of surface water resources in the big sunflower river watershed using coupled SWAT–MODFLOW model. *Water* 11(3): 528.
6. Ghodrati, M. and F. Barzegari. 2012. Mathematical Models of Groundwater Applied Learning of GMS7.1. Simayedanesh, Tehran (In Farsi).
7. Kamali, A. and M. H. Niksokhan. 2017. Development of a model for calculation of sustainability index of groundwater resources. *Iranian Journal of Eco Hydrology* 4(4): 1071-1087 (In Farsi).
8. Kermanshah Regional Water Authority. 2015. Timely studies of water resources balance of Karkheh River watershed up to 2009-2010 water year. 5th volume: Water resources evaluation report, Appendix 35: Water resources balance report of Malayer plain (2235).
9. Khatiri, K. N., M. H. Niksokhan, A. Sarang and A. Kamali. 2020. Coupled simulation-optimization model for the management of groundwater resources by considering uncertainty and conflict resolution. *Water Resources Management* 34(11): 3585-3608.
10. Kouchakzadeh, M. and F. Nasirisaleh. 2014. Evaluation of the efficiency of using surface water simulation results to improve the accuracy of groundwater simulation in Silakhor shallow aquifer located in Lorestan province (Iran). *Modares Civil Engineering Journal* 14(3): 129-138 (In Farsi).
11. Mirahmadipour, S. 2018. Assessment of the effects of underground dams on artificial recharge of aquifers leading to deserts. Master thesis, Shiraz University, Shiraz, I.R. Iran (In Farsi).
12. Mosase, E., L. Ahiablame, S. Park and R. Bailey. 2019. Modelling potential groundwater recharge in the Limpopo River Basin with SWAT-MODFLOW. *Groundwater for Sustainable Development* 9(4): 100260.
13. Naeb, S., S. Javadi and M. E. Banihabib. 2020. Application of SWAT-MODFLOW integrated model for simultaneous modeling of surface and groundwater to improve basin-scale water resources system status. *Iran Water Resources Research* 16(1): 42-58 (In Farsi).
14. Saberimehr, S., A. Asghari Moghaddam and A. Nadiri. 2017. Modeling groundwater flow and salinity intrusion at Shabestar plain aquifer using GMS software model. *Quaternary Journal of Iran* 3(1): 41-50 (In Farsi).
15. Wei, X., R. T. Bailey, R. M. Records, T. C. Wible and M. Arabi. 2019. Comprehensive simulation of nitrate transport in coupled surface-subsurface hydrologic systems using the linked SWAT-MODFLOW-RT3D model. *Environmental Modelling and Software* 122: 104242.
16. Yifru, B. A., I. M. Chung, M. G. Kim and S. W. Chang. 2020. Assessment of groundwater recharge in agro-urban watersheds using integrated SWAT-MODFLOW model. *Sustainability* 12(16): 6593.
17. Zare Abyaneh, H., M. Bayat Varkeshi, and S. Marofi. 2012. Investigating water table depth fluctuations in the Malayer Plain. *Water and Soil Science* 22(2): 173-190.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 3, Fall 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Modeling of Malayer Aquifer by MODFLOW Groundwater Model and SWAT Surface Water Simulation Model

G. Samadi*, S. F. Mousavi and H. Karami[1]

(Received: September 18-2021 ; Accepted: December 20-2021)

Abstract

The impact of different management options on the region and the existing conditions can be evaluated with minimal cost and time to select the most practical case using various tools including mathematical models. In this study, the SWAT hydrological model was performed from 2009 to 2019 using climatic, hydrological, and hydrometric data in the Malayer catchment, and the final model was validated by SWAT-CUP. To reduce the amount of uncertainty in the input parameters to the MODFLOW model, using the values of surface recharge from the implementation of the SWAT hydrological model, quantitative modeling of Malayer aquifer was performed more reliably in GMS software by using MODFLOW model. After modeling the study area in the 2009-2018 period and calibrating the model in the years from 2018 to 2019, the mean values of absolute error (MAE) were 0.35-0.65 m, and root means square error (RMSE) was 0.62-0.94 m, which seems acceptable considering computational and observational heads equal to 1650 m. Results of water level changes in observation wells located in the Malayer region indicate that the groundwater level in the aquifer has decreased by an average value of 9.7 m in the 10-year study period.

Keywords: Quantitative modeling, Malayer aquifer, Groundwater, GMS, MODFLOW, SWAT

1. Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
*: Corresponding author, Email: samadi.golmehr@semnan.ac.ir