

بررسی کارایی استفاده از نتایج شبیه‌سازی آب سطحی در افزایش دقت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

محمد حسین کوچکزاده^۱، فرزین نصیری‌صالح^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

nasiri_f@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۲۲

چکیده- در این مقاله، کارایی استفاده از نتایج شبیه‌سازی جریان آب سطحی در افزایش دقت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی بررسی شده است. از مهم‌ترین ورودی‌های شرایط مرزی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مقادیر تغذیه، تبخیر و تعرق و چگونگی توزیع آنها در منطقه است که همواره اطلاعات کمی از آنها در دسترس است. تعریف نادرست از این مقادیر در شبیه‌سازی آبخوان منجر به کاهش دقت و عدم کارایی مدل در مدیریت منابع آب زیرزمینی می‌شود. برای حل این مشکل، از نتایج شبیه‌سازی جریان آب سطحی با مدل SWAT برای مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق به عنوان ورودی‌های مدل MODFLOW استفاده شد. در نتیجه، این مقادیر با قطعیت بالاتر و توزیع مناسب‌تری برای این مدل تعریف شدند. کارایی این روش در آبخوان کم عمق دشت سیلاخور در ایران ارزیابی شد. با مقایسه تراز ایستایی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در ۲۰ چاه پیزومتریک در دوره ۹ ماهه از سال ۲۰۰۹، میانگین خطای مطلق کمتر از ۱ متر و مجذور میانگین خطاها ۱ متر به دست آمد. بار دیگر آبخوان دشت سیلاخور با استفاده از مدل MODFLOW و لحاظ کردن درصدی از بارش منطقه به عنوان تغذیه و اطلاعات موجود در ایستگاه تبخیرسنجی سیلاخور برای تبخیر و تعرق و بدون استفاده از نتایج مدل SWAT شبیه‌سازی شد. مقایسه دقت به دست آمده از روش مدل ترکیبی با روش دوم، نشان از کارایی روش ترکیبی در افزایش دقت دارد.

واژگان کلیدی: مدل SWAT، مدل MODFLOW، شرایط مرزی، آبخوان دشت سیلاخور.

۱- مقدمه

در استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در مدیریت منابع آب، اطمینان از صحت شبیه‌سازی انجام‌شده بسیار مهم است. مدل آب زیرزمینی تهیه‌شده برای محدوده‌ای معین باید تا حد امکان بر شرایط طبیعی منطقه منطبق باشد تا بتوان از آن برای مقاصد پیش‌بینی و مدیریت استفاده کرد.

اصلی‌ترین منبع تأمین آب شرب و کشاورزی در ایران آبهای زیرزمینی است. در سالیان اخیر، خشکسالی‌های پی در پی و برداشت بی‌رویه منجر به کاهش محسوس این منابع شده است. استمرار یا توسعه بهره‌برداری از این آب‌ها مستلزم شناخت ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان و

این شرایط برای مدل، با عنوان شرایط مرزی تعریف شده و شامل چاه‌ها، تغذیه از منابع سطحی، شرایط در مرزها، رودخانه‌ها، زهکش‌ها و تبخیر و تعرق است (Harbaugh, 2005).

مهم‌ترین شرایط مرزی مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق است که اطلاعات کمی از آن‌ها در دسترس است. در بیشتر پژوهش‌های پیشین در ایران، این مقادیر برای مدل به صورت درصدی از میانگین بارش منطقه برای تغذیه و مقادیر تبخیر ثبت شده در ایستگاه‌های تبخیرسنجی برای تبخیر و تعرق تعریف و با روند سعی و خطا در مرحله کالیبراسیون مدل قطعی شده است. حال آنکه این مقادیر مستقل از فرآیندهای هیدرولوژیکی سطحی نبوده و با عواملی مانند بارش، رواناب سطحی و ویژگی‌های جریان در ناحیه غیر اشباع خاک در ارتباط است (Kim و همکاران, 2008).

از راه‌کارهای مؤثر در افزایش دقت مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق، شبیه‌سازی جامع فرآیندهای هیدرولوژیکی در تقابل با یکدیگر و استفاده از نتایج حاصل در مدل آب زیرزمینی است. پژوهش‌های زیادی در دنیا با استفاده از مدل‌های ترکیبی SWAT و MODFLOW انجام شده است. Sophocleous و Perkins (2000) از مدل ترکیبی SWAT-MOD برای پیش‌بینی آثار آبیاری کشاورزی بر رواناب سطحی و تراز ایستایی آب زیرزمینی در حوضه‌ای در کانزاس آمریکا استفاده کرد. مدل SWAT-MOD پیش از این به وسیله‌ی Sophocleous و همکاران (1999) ارائه شد که قادر بود رواناب سطحی، آب زیرزمینی و اندرکنش رودخانه-آبخوان در حوضه‌های یکپارچه را شبیه‌سازی کند. آنها از نتایج تبخیر و تعرق پتانسیل حاصل از مدل SWAT در مدل MODFLOW و از نتایج بالآمدگی آب زیرزمینی به لایه‌های بالایی (جریان زیرسطحی) برای مدل

SWAT استفاده کردند. Galbiati و همکاران (2006) از مدل ترکیبی SWAT و MODFLOW برای ارزیابی کمی و کیفی جریان آب سطحی و زیرزمینی در حوضه Bonello در ایتالیا استفاده کردند. آنان میزان نیترات ورودی به آبخوان از منابع سطحی، اندرکنش آبخوان و رودخانه و نرخ جریان و نیترات در خروجی حوضه را بررسی کردند. Kim و همکاران (2008) از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW برای رفع نواقص مرتبط با خاصیت نیمه‌توزیعی مدل SWAT در لحاظ‌نمودن جنبه‌های مرتبط با آب زیرزمینی استفاده کرد. برای رفع این مشکل، آنان، واحدهای واکنش هیدرولوژیکی (HRU) در مدل SWAT را با سلول‌های شبکه در مدل MODFLOW جایگزین کردند. Chung و همکاران (2010) از همین روش برای برآورد تغییرات زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی در حوضه Mihoccheon در کره جنوبی استفاده کردند. Luo و Sophocleous (2011) مدل ترکیبی SWAT و MODFLOW را برای شبیه‌سازی نرخ تغذیه فصلی آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق از آن و بیلان سالانه آب در حوضه Hetao Irrigation District در چین بکار بردند.

بررسی نتایج حاصل از تحقیقات فوق مبین این نکته است که استفاده همزمان از دو مدل SWAT و MODFLOW برای شناخت شرایط هیدرولوژیکی در یک منطقه به خوبی توانسته است نقایص مرتبط با محدودیت‌های نیمه‌توزیعی و توزیعی بودن دو مدل را پوشش دهد. در اکثر این مطالعات، تمرکز اصلی بر روی دو پارامتر تغذیه و تبخیر و تعرق و تلاش در راستای افزایش دقت مقادیر این دو پارامتر در شبیه‌سازی‌ها بوده است.

در این تحقیق، برای افزایش دقت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با مدل MODFLOW-2000، از مقادیر تغذیه، تبخیر و تعرق و نحوه توزیع حاصل از مدل SWAT-2005، به عنوان دو کمیت اصلی شرایط مرزی در مدل‌سازی آب

مانتیت، پریسلی- تیلور و هارگریوز محاسبه می‌کند (Neitsch) و همکاران (۲۰۰۵).

۲-۲- مدل MODFLOW

MODFLOW، مدلی فیزیک‌محور است که معادله داریسی را با تعادل جرم برای جریان زیرسطحی ترکیب می‌کند (Kim و همکاران ۲۰۰۸). این مدل قادر به شبیه‌سازی شرایط متفاوتی از آبخوان مانند محصور، غیر محصور، نشتی، دارای عملکرد تأخیری و شرایط محصور/ آزاد تبدیل‌شونده است. محدوده‌های همروند و غیرهمروند، می‌توانند هم به حالت همگن و هم به صورت ناهمگن، مدل شوند. هر دو حالت دائمی و غیر دائمی برای جریان آرام، می‌تواند در این مدل شبیه‌سازی شود. تمام شرایط مرزی شامل بارهای هیدرولیکی و فشارهای ثابت، جریان‌های ثابت یا متغیر، جریان‌ها و بارهای هیدرولیکی وابسته به زمان، تغذیه و تخلیه آب زیرزمینی، نقاط برداشت و زهکش‌ها برای مدل قابل تعریف است. چندین فعل و انفعالات سطحی- زیرسطحی مانند تبخیر و تعرق و اندرکنش رودخانه- آبخوان می‌توانند به گونه رضایت‌بخشی به وسیله‌ی مدل شبیه‌سازی شود. امکان انتخاب از بین گزینه‌های مختلف تکنیک‌های حل معادلات، MODFLOW را به ابزاری قدرتمند برای مسائل پیچیده، تبدیل کرده است (Ramireddigary ۱۹۹۸).

۲-۳- الگوریتم پژوهش

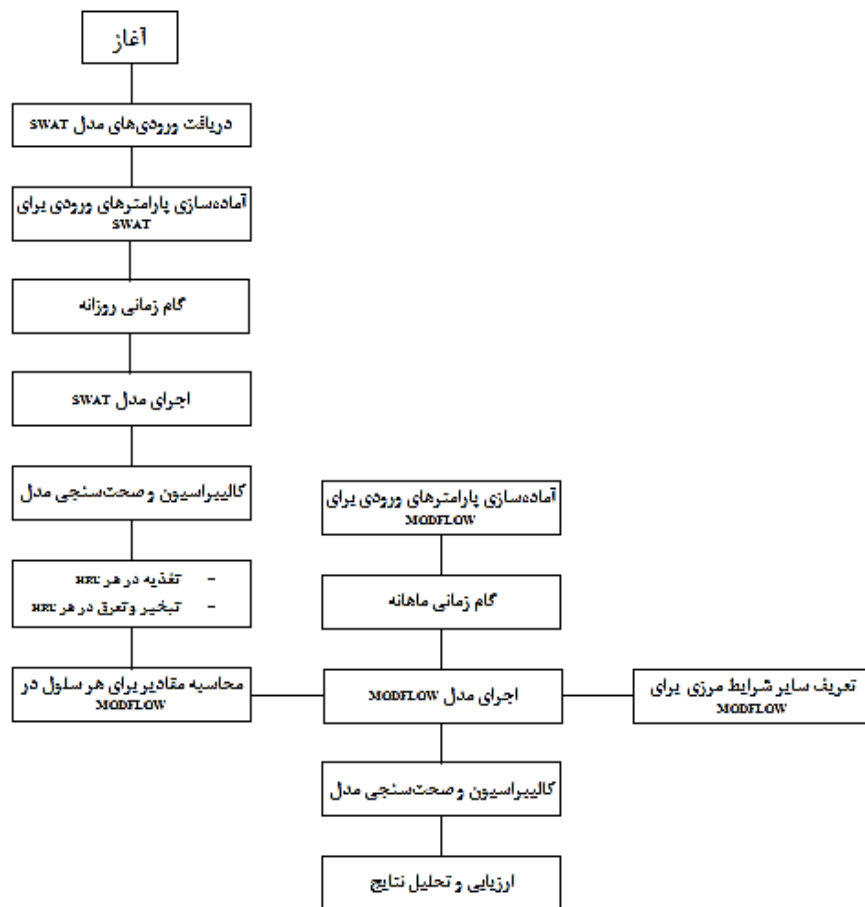
در این پژوهش برای شبیه‌سازی سطحی از مدل هیدرولوژیکی SWAT-2005 استفاده شده و پس از انطباق مدل بر منطقه، مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق حاصل از آن برای MODFLOW-2000 استفاده شده‌است. شکل ۱ فلوچارت محاسباتی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

زیرزمینی استفاده شده و این کمیت‌ها از روند کالیبراسیون مدل آب زیرزمینی حذف شده‌است. این روش در مدل‌سازی آبخوان‌هایی که در آنها اطلاعات کافی از شرایط مرزی مورد نیاز موجود نیست، می‌تواند مؤثر و کارا باشد. در این پژوهش، روش فوق برای نخستین بار در ایران بر روی آبخوان دشت سیلاخور با وسعت ۵۹۰ کیلومترمربع انجام شد. برای ارزیابی کارایی روش پژوهش در افزایش دقت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، آبخوان دشت سیلاخور بار دیگر با استفاده از مدل MODFLOW-2000 و روش‌های مورد استفاده در پژوهش‌های پیشین و بدون استفاده از نتایج مدل SWAT-2005 شبیه‌سازی شده و نتایج با روش پژوهش مقایسه شده‌است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل SWAT

SWAT مدلی نیمه‌توزیعی و پیوسته در زمان است که برای پیش‌بینی دراز مدت آثار مدیریت، رسوب و سموم کشاورزی بر آب در حوضه‌های بدون ایستگاه طراحی شده‌است (Neitsch و همکاران ۲۰۰۵). در این مدل فرایندهای هیدرولوژیکی در هر واحد واکنش هیدرولوژیکی و روندیابی مقادیر به سمت خروجی حوضه محاسبه می‌شود. با استفاده از رویکرد واحدهای واکنش هیدرولوژیکی (اراضی یکپارچه با پوشش خاک و کاربری یکسان) مدل SWAT قادر به محاسبه ناهمگنی‌های موجود حوضه‌های بزرگ به صورت فیزیکی شده‌است (Sophocleous و Perkins ۲۰۰۰). در مدل SWAT رواناب سطحی با استفاده از روش‌های شماره عدد منحنی اصلاح شده سازمان حفاظت خاک آمریکا و گرین و امپت و روندیابی جریان با استفاده از دو روش ذخیره متغیر و ماسکینگ‌هام قابل محاسبه است. این مدل میزان تبخیر و تعرق را با استفاده از سه روش پنمن-



شکل (۱) فلوچارت محاسباتی در این تحقیق

مدل SWAT و سایر داده‌های مورد نیاز، مدل MODFLOW اجرا و کالیبره شد. برای ارزیابی این روش در افزایش دقت شبیه‌سازی آبخوان، بار دیگر MODFLOW به صورت مستقل و با لحاظ کردن درصدی از میانگین بارش منطقه به عنوان تغذیه و اطلاعات موجود از مقادیر تبخیر در منطقه برای تبخیر و تعرق اجرا شد و نتایج حاصل با روش پژوهش مقایسه شد.

۳- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد نیاز

۳-۱- منطقه مطالعاتی

روش مد نظر در این پژوهش روی آبخوان دشت سیلاخور ارزیابی شد (شکل ۲). دشت سیلاخور با وسعت ۲۱۱۸

از آنجا که مدل MODFLOW دارای تقسیم‌هایی به صورت زیرحوضه یا HRU نیست، از تقسیم HRU حاصل از مدل SWAT برای توزیع این مقادیر استفاده شده‌است.

این مقادیر به صورت میانگین سطحی به سلول‌های متناظر در مدل MODFLOW تخصیص یافته‌است. مدل MODFLOW تغذیه را به صورت مستقیم به عنوان ورودی دریافت می‌کند. همچنین این مدل مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل را به عنوان ورودی دریافت و اقدام به محاسبه تبخیر و تعرق به صورت خطی تا عمق بی‌اثری^۱ می‌کند. با این روش، تبخیر و تعرق از تراز ایستایی آب زیرزمینی، پتانسیل است. به این ترتیب با تعریف این مقادیر حاصل از

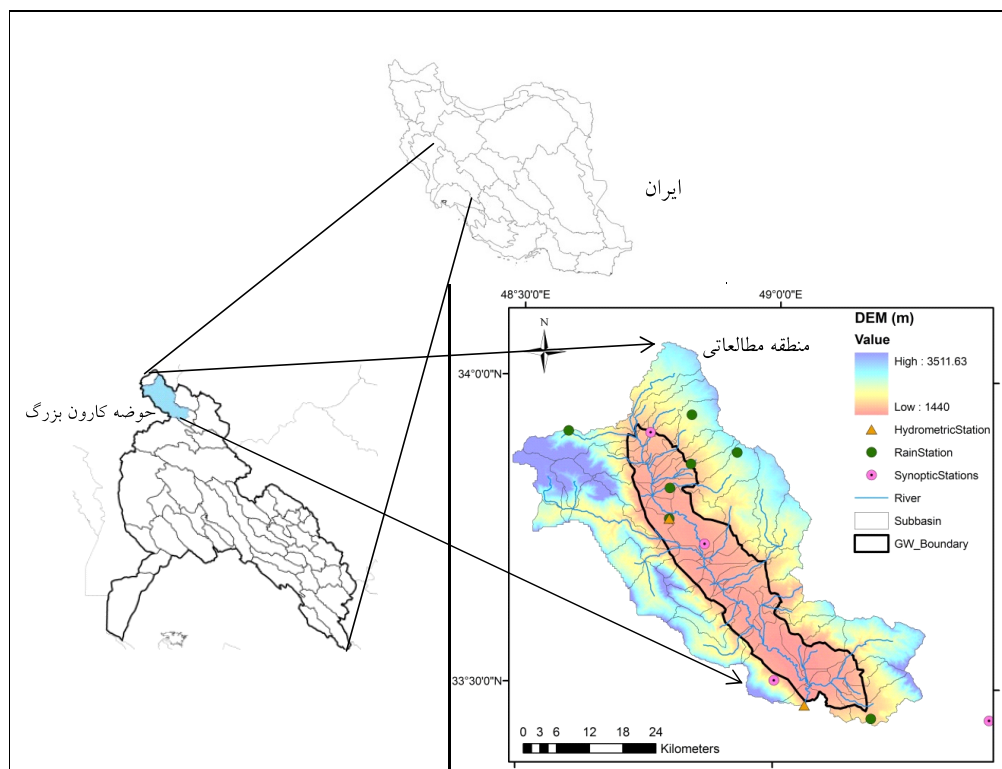
1- Extinction depth

۳-۲- جمع‌آوری داده‌ها

مدل SWAT نیاز به اطلاعات جامع آب و هوایی، کاربری اراضی، توپوگرافی و خاک دارد. در این پژوهش، آماده‌سازی داده‌ها برای مدل SWAT-2005 به صورت اتوماتیک به وسیله نرم‌افزار ArcSWAT-2.3.4 و در محیط ArcGIS9.3 انجام شد. برای این منظور، از نقشه کاربری اراضی دریافتی از آب منطقه‌ای استان لرستان و نقشه بافت جهانی برای خاک استفاده شد (شکل ۳ الف و ب). برای توپوگرافی از نقشه DEM با ابعاد سلول ۳۰ متر استخراج شده از خطوط توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ استفاده شد. بارش روزانه از هفت ایستگاه باران‌سنجی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی ایران و چهار ایستگاه سینوپتیک سازمان هواشناسی ایران استخراج شد که به طور کامل پوشش دهنده سطح حوضه است (شکل ۲).

کیلومترمربع بخشی از حوضه آبریز کارون بزرگ در ایران است که در محدوده بین $33^{\circ}26'40''$ و $34^{\circ}03'54''$ عرض شمالی و $48^{\circ}28'48''$ و $49^{\circ}17'60''$ طول شرقی قرار دارد. رودهای دائمی این دشت شامل سیلاخور، تیره و بیاتون است. مهمترین ارتفاعات منطقه شامل کوه گرین با ارتفاع ۳۳۷۸ متر در جنوب غربی و میش‌پرور با ارتفاع ۳۳۷۸ متر در شمال غربی دشت بوده و اقلیم آن از نوع نیمه مرطوب است (یوسفوند ۱۳۸۹).

دشت سیلاخور به دلیل وجود آب فراوان، خاک مناسب و زمین هموار، از کشاورزی پر رونقی برخوردار است. بزرگترین منبع تأمین‌کننده آب منطقه، آبخوان دشت سیلاخور است که از قسمت شمال غربی تا جنوب شرقی امتداد دارد (یوسفوند ۱۳۸۹). عمق ایستایی آب در آبخوان دشت سیلاخور در ماه‌های مختلف سال از ۰/۷۵ تا ۴۰ متر متغیر است.



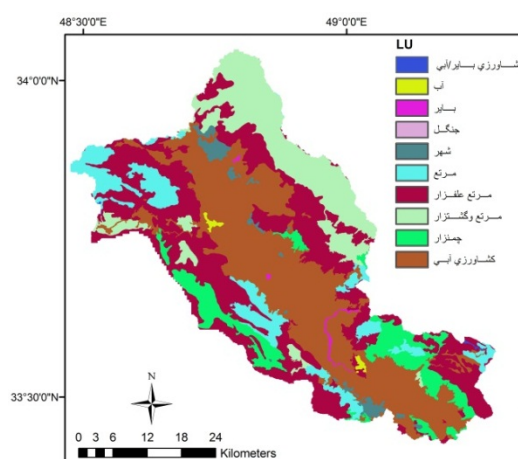
شکل (۲) منطقه مطالعاتی دشت سیلاخور واقع در حوضه آبریز کارون بزرگ و موقعیت آبخوان این دشت

۲۰۰۹ تا ۲۰ مارس ۲۰۱۰ نموده‌اند. محدوده آبخوان با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه، نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی، موقعیت گسل‌ها در منطقه و نیز وضعیت پراکندگی چاه‌های حفر شده در منطقه، تعیین شد (شکل ۲). بر اساس گزارش‌های موجود، آبخوان دشت سیلاخور از نوع آزاد است که برای مدل MODFLOW تعریف شد (یوسفوند ۱۳۸۹). در سالیان اخیر، آزمایش‌های پمپاژ محدودی در ده نقطه از دشت انجام شده‌است. برای اطلاعات مربوط به ضرائب هیدرودینامیکی آبخوان از نتایج حاصل از این آزمایش‌ها استفاده شد. بر این اساس، هدایت هیدرولیکی آبخوان از ۰/۲ تا ۱۰ متر در روز، ضریب انتقال از ۱۵۰ تا ۲۰۰ مترمربع در روز و ضریب ذخیره از ۰/۱ تا ۰/۵ در نقاط مختلف دشت متغیر است (یوسفوند ۱۳۸۹). در دشت سیلاخور، چاه‌های زیادی با پراکندگی بالا به وسیله بومی‌های منطقه برای استخراج آب حفر شده‌است. اطلاعات مربوط به این چاه‌ها از آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت و با دقت مناسبی برای مدل استفاده شد. همچنین به پیشنهاد کارشناسان آب منطقه‌ای استان لرستان، برای سنگ بستر از اطلاعات عمق چاه‌های حفر شده در منطقه با فرض امتداد آنها تا سنگ بستر استفاده شد. برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل MODFLOW، از اطلاعات تراز آب در ۲۰ چاه دیده شده دریافتی از آب منطقه‌ای استان لرستان استفاده شد (شکل ۴).

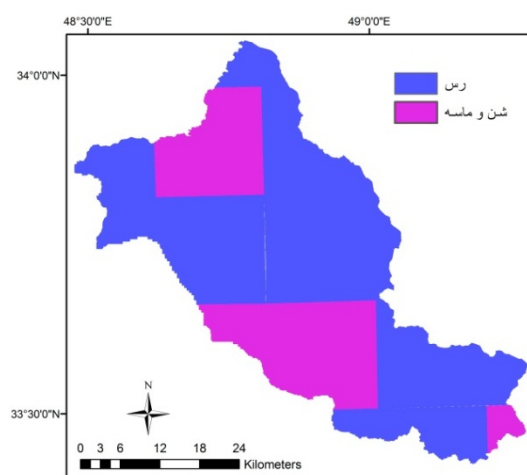
۴- نتایج و بحث

۴-۱- کالیبراسیون و صحت‌سنجی SWAT

پس از تعریف ورودی‌های مورد نیاز برای مدل SWAT، این مدل در دوره ۸ ساله از ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ اجرا شد. از سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ به منظور کالیبراسیون مدل و چهار سال دوم برای صحت‌سنجی استفاده شد. در مدل SWAT،



الف



ب

شکل (۳) نقشه کاربری اراضی و خاک مورد استفاده در تحقیق الف:

کاربری اراضی، ب: خاک

برای مقادیر روزانه بیشینه و کمینه دما، تشعشع خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی از آمار چهار ایستگاه سینوپتیک سازمان هواشناسی ایران استفاده شد. به منظور کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل SWAT، داده‌های دبی مورد نیاز است. این آمار برای دو ایستگاه هیدرومتری موجود در منطقه از آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت شد. اطلاعات مورد نیاز آب زیرزمینی نیز از شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت شد. کارشناسان این شرکت اقدام به جمع‌آوری کلی اطلاعات آب زیرزمینی در دوره یک ساله از ۲۱ مارس

برای محاسبه رواناب سطحی از روش شماره منحنی اصلاح شده سازمان حفاظت خاک امریکا، برای روندیابی از روش ذخیره متغیر و برای محاسبه تبخیر و تعرق از روش هارگریوز استفاده شد. برای شبیه‌سازی، مدل SWAT در مجموع به ۷۱ زیرحوضه و ۸۰۵ HRU تقسیم شد. تقسیمات مربوط به زیرحوضه بر اساس توپوگرافی منطقه و HRU بر اساس همپوشانی نقشه‌های خاک و کاربری اراضی توسط نرم‌افزار به صورت اتوماتیک انجام شده و کاربر نقشی در آن ندارد. کالیبراسیون مدل بر اساس آمار دبی در دو ایستگاه هیدرومتری سیلاخور و تیره دورود انجام شد. برای این منظور، از نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده و پارامترهای فاقد اطلاعات طی فرایند سعی و خطا به وسیله نرم‌افزار تعیین شد. نتایج حاصل از کالیبراسیون نشان از اهمیت بالای پارامترهای زمان سفر جریان جانبی (۱۲.۴ روز)، شماره منحنی و هدایت هیدرولیکی بستر کانال فرعی (۲۴.۴ میلیمتر در ساعت) داشت. مقادیر دبی ماهانه محاسبه شده به وسیله مدل و مقادیر مشاهده شده برای دو ایستگاه هیدرومتری در شکل‌های ۵ الف و ب ارائه شده‌است. بیشترین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و محاسباتی مربوط به دو ماه آخر سال ۲۰۰۸ و ماههای نخستین ۲۰۰۹ در دوره صحت‌سنجی مدل است. به توجه به بارش مشاهده‌شده در این دوره می‌توان به این نتیجه

رسید که مقادیر شبیه‌سازی شده به وسیله مدل در مقایسه با مقادیر مشاهداتی منطقی‌تر به نظر می‌رسد. علاوه بر این با توجه به وجود این اختلاف برای هر دو ایستگاه می‌توان گفت که این اختلاف احتمالاً ناشی از برداشت بیشتر از رودخانه در این دوره به فراخور نیاز بوده‌است و داده‌های بارش و دبی ثبت شده در ایستگاه‌های منطقه و دو ایستگاه هیدرومتری صحیح است.

دقت شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از معیارهای ضریب همبستگی (R^2)، نش-ساتکلیف (NSC) و جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) ارزیابی شد (جدول ۱). پس از انطباق مدل بر منطقه، مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق پتانسیل در محدوده آب زیرزمینی استخراج شد (جدول ۲).

۴-۲- کالیبراسیون و صحت‌سنجی MODFLOW

اطلاعات منابع آب زیرزمینی دشت سیلاخور تنها در دوره یک ساله از ۲۱ مارس ۲۰۰۹ تا ۲۰ مارس ۲۰۱۰ موجود است. مدلسازی آبخوان دشت سیلاخور در دوره ۹ ماهه از سال ۲۰۰۹ (۲۱ مارس تا ۲۲ دسامبر مشترک میان SWAT و MODFLOW) انجام شد.

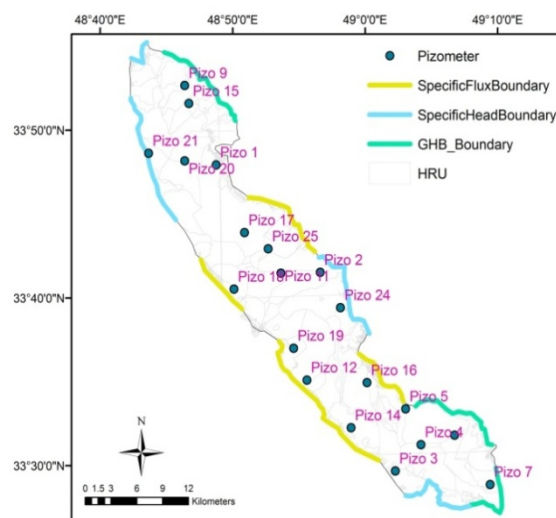
در مدلسازی آبخوان با توجه به هیدروگراف دشت، دوره یک ماهه از ۲۳ اکتبر تا ۲۲ نوامبر به عنوان دوره پایدار و دوره مدلسازی به عنوان دوره ناپایدار لحاظ شد.

جدول (۱) مقادیر شاخص دقت شبیه‌سازی مدل SWAT در دو ایستگاه هیدرومتری سیلاخور و تیره دورود

شاخص	رابطه	ایستگاه سیلاخور		ایستگاه تیره دورود	
		دوره کالیبراسیون	دوره اعتبارسنجی	دوره کالیبراسیون	دوره اعتبارسنجی
ضریب همبستگی	$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}$	۰/۸۳	۰/۵۴	۰/۷۷	۰/۷
نش - ساتکلیف	$CNS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}$	۰/۷۶	۰/۴۲	۰/۶۲	۰/۱۵
جذر میانگین مربع خطاها (m ³ /s)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}$	۱/۸۶	۲/۹۳	۸/۲	۱۱/۷
$Q_{m,i}$: مقادیر مشاهداتی $\bar{Q}_{m,i}$: میانگین مقادیر مشاهداتی $Q_{s,i}$: مقادیر شبیه‌سازی $\bar{Q}_{s,i}$: میانگین مقادیر شبیه‌سازی					

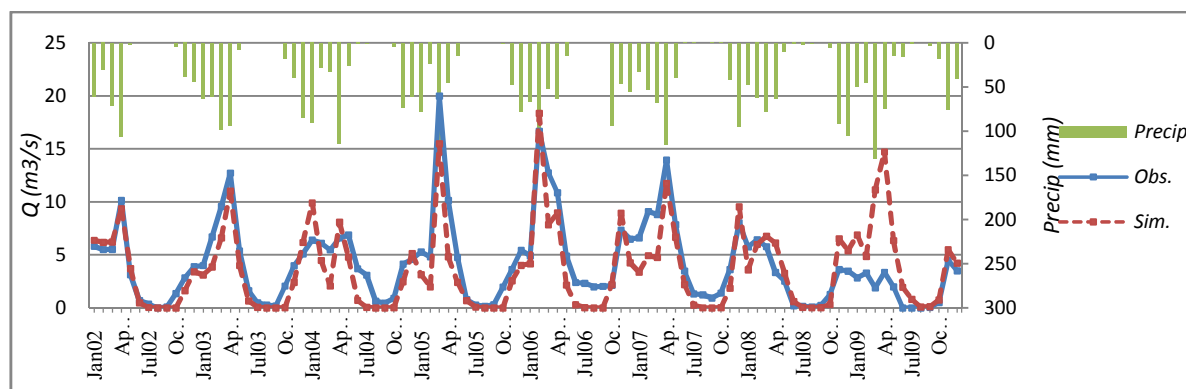
غیر محصور بودن این آبخوان است.

مرزهای لحاظ شده برای آبخوان دشت سیلاخور در شکل ۴ نشان داده شده است. بر این اساس، مرزهای جریان ورودی به محدوده به صورت جریان ثابت، مرزهای با جریان خروجی به صورت بار هیدرولیکی متغیر (بار هیدرولیکی عمومی)، مرزهایی از محدوده همسو با جهت جریان آب زیرزمینی (استخراج شده از نقشه خطوط هم تراز ایستایی آب زیرزمینی) به صورت بار هیدرولیکی ثابت و سایر مرزها به صورت بدون جریان در نظر گرفته شد. سلول‌های متناظر با محل رودخانه‌های دائمی در منطقه به صورت هد ثابت لحاظ شد. ضریب انتقال بستر رودخانه‌ها معادل ده درصد لایه آبخوان لحاظ و در مرحله کالیبراسیون مدل قطعی شد.

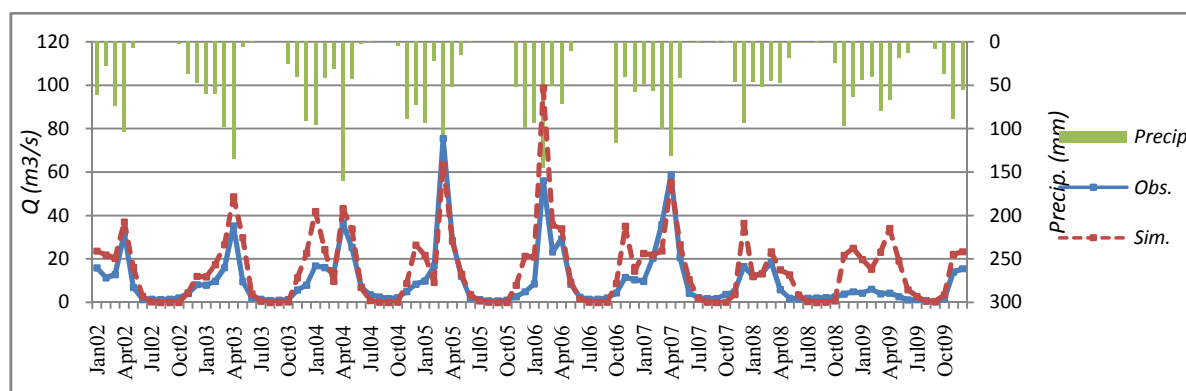


شکل (۴) محدوده آبخوان دشت سیلاخور، موقعیت پیزومترها، نوع مرزها و HRUهای تحت پوشش

میزان برداشت سالانه آب از آبخوان دشت سیلاخور بیانگر

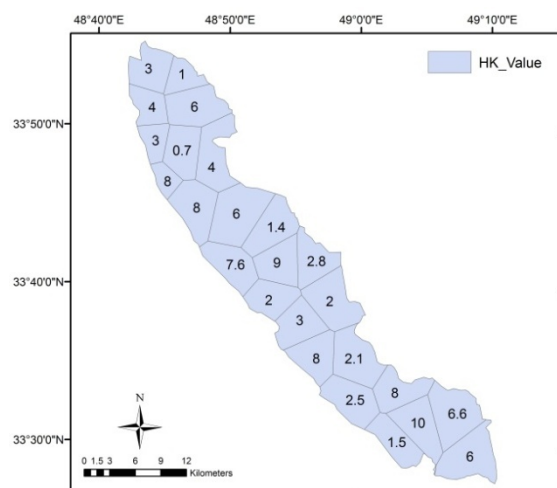


الف



ب

شکل (۵) نمودار مقایسه‌ای رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل SWAT الف: ایستگاه سیلاخور، ب: ایستگاه تیره دورود



شکل (۶) نحوه پلیگون‌بندی محدوده آب زیرزمینی برای اختصاص ضرائب هیدرودینامیکی آبخوان و مقادیر هدایت هیدرولیکی

کالیبراسیون مدل بر اساس اطلاعات بار هیدرولیکی در ۲۰ چاه پیژومتریک و با استفاده از مدل معکوس PEST انجام شد. به منظور ارزیابی روش پژوهش، بار دیگر مدل MODFLOW بر اساس نتایج به دست آمده برای ضرائب هیدرودینامیکی و روش‌های رایج در پژوهش‌های پیشین و این بار با لحاظ نمودن مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از میانگین بارش منطقه به عنوان تغذیه (با توجه به نوع اقلیم منطقه) و اطلاعات تبخیر در ایستگاه تبخیرسنجی سیلاخور (به عنوان شاخص برای منطقه) برای تبخیر و تعرق اجرا شد. دقت مدل‌سازی انجام‌شده با استفاده از دو روش بر اساس معیارهای جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) ارزیابی شد. مقادیر مربوطه در جدول ۳ ارائه شده‌است.

۴-۳- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، کارایی استفاده از نتایج شبیه‌سازی آب سطحی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق و توزیع آنها در منطقه در افزایش دقت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی بررسی شد. مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق از مهم‌ترین ورودی‌های مورد نیاز در مدل‌سازی

در مجموع در مدل‌سازی تعداد ۹۹۷ حلقه چاه تعریف شد که آبی معادل ۵۵۱ میلیون مترمکعب در دوره یکساله از آبخوان استخراج نموده‌اند. محدوده آبخوان در مجموع در برگیرنده ۳۴۲ واحد از مجموع ۸۰۵ واحد واکنش هیدرولوژیکی است (شکل ۴). مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق مربوط به هر پلیگون به طور مجزا برای مدل MODFLOW تعریف شد. ضرائب هیدرودینامیکی آبخوان از گزارش‌های موجود مورد استفاده و در مرحله کالیبراسیون مدل در محدوده مجاز تغییرات قطعی شدند. برای تخصیص این مقادیر به مدل، ۲۵ منطقه پلیگونی تعریف شد (شکل ۶).

جدول (۲) مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق حاصل از مدل SWAT برای

محدوده آبخوان دشت سیلاخور

دوره زمانی	تبخیر و تعرق پتانسیل (mm)	تغذیه (mm)	بارش (mm)
۲۱ مارس ۲۰۰۹	-	-	-
۲۱ آوریل ۲۰۰۹	۹۶٫۵	۴	۶۴٫۶
۲۲ می ۲۰۰۹	۱۵۵٫۱	۳٫۵	۲۳٫۲۵
۲۲ ژوئن ۲۰۰۹	۱۹۹	۲٫۷	۱۲٫۵
۲۳ ژوئیه ۲۰۰۹	۲۳۱٫۵	۲٫۱۵	۰٫۵۵
۲۳ اوت ۲۰۰۹	۲۱۲٫۸	۱٫۷	۰
۲۳ سپتامبر ۲۰۰۹	۱۴۵	۱٫۳	۱۲٫۲
۲۳ اکتبر ۲۰۰۹	۹۸٫۸	۱	۳۹٫۴
۲۲ نوامبر ۲۰۰۹	۵۰	۱٫۲	۸۱٫۸
۲۲ دسامبر ۲۰۰۹	۳۴٫۸	۱٫۶	۵۶٫۶

جدول (۳) نتایج دقت تراز آب محاسبه شده و دیده شده در ۲۰ چاه پیژومتریک با استفاده از روش مورد استفاده در پژوهش و مدل‌سازی

بدون استفاده از SWAT

شاخص دقت		شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی	
(m)	(m)	مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW	
۰٫۷۴	۱٫۰۴	تغذیه معادل پنج درصد بارش	
۱٫۲۱	۱٫۷۲	تغذیه معادل ده درصد بارش	
۱٫۵۴	۲٫۳	تغذیه معادل پانزده درصد بارش	
۱٫۸۶	۲٫۹۳	تغذیه معادل پانزده درصد بارش	

- [2] Sophocleous, M., and Perkins, S., (2000). "Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas" *Journal of Hydrology*, S0022-1694(00)00293-6.
- [3] Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygar, S.R., Perkins, S.P., 1999. "Integrated numerical modeling for basin wide water management: the case of the Rattlesnake Creek basin in South Central Kansas" *J. Hydrol.* 214 (1-4), 179-196.
- [4] Galbiati L., Bouraoui F., Elorza F.J., Bidoglio G, (2005), "Modelling diffuse pollution loading into a Mediterranean lagoon: Development and application of an integrated surface-subsurface model tool" *Ecological Modelling* 10.1016/j.ecomodel. 2005.07.036.
- [5] Kim N., Chung I., Won Y., Arnold J., (2008), "development and application of the integrater SWAT-MODFLOW model ", *Journal Of Hydrology*, 10.1016/j.jhydrol.2008.02.024.
- [6] Chung I., Kim N., Lee J., Ar Sophocleous M., (2010), " Assessing distributed groundwater recharge rate using integrated surface water-ground water modelling: application to Mihocheon watershed, south korea ", *Hydrology journal*, 10.1007/s10040-010-0593-1.
- [7] Luo, Yi. and Sophocleous, M., (2011). "Tow-way coupling of unsaturated-saturated flow by integrating the SWAT and MODFLOW models with application in an irrigation district in arid region of West China", *Journal of Arid Land*, 10.3724/SP.J.1227.2011.00164.
- [8] Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., (2005) "Soil And Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2005"
- [9] Ramireddigary, S.R., (1998), "A Comprehensive, Integrated Computer Model For Basin-Wide Water Resources Management," submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree doctor of philosophy, Department of civil engineering, Kansas State University.

[۱۰] یوسفوند. پ، " بررسی تاثیر خشکسالی و ترسالی بر نوسانات آب زیرزمینی و بهره برداری از آن از طریق مدل MODFLOW (مطالعه موردی آبخوان دشت سیلاخور - استان لرستان)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۳۸۹.

جریان آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW است که همواره اطلاعات کمی از مقدار و توزیع آنها در منطقه موجود است و در مدلسازی کمتر به آن توجه می شود. مدل SWAT اقدام به محاسبه این مقادیر در ارتباط با سایر فرایندهای هیدرولوژیکی و ارائه آنها در هر HRU می کند. در نتیجه مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق با قطعیت بالاتر و توزیع مناسب تری برای مدل آب زیرزمینی تعریف می شود. برای این منظور، پس از مدلسازی فرایندهای هیدرولوژیکی سطحی با استفاده از مدل SWAT-2005 و انطباق آن بر منطقه، مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق در هر HRU به صورت مستقل به سلول های متناظر در مدل MODFLOW-2000 تخصیص یافت. روش مدنظر در این پژوهش برای آبخوان دشت سیلاخور به کار گرفته شده و کارایی آن با مقایسه روش های متداول در پژوهش های پیشین ارزیابی شد. بر این اساس، میانگین خطای مطلق تراز آب دیده شده و محاسبه شده در شبیه سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW در ۲۰ چاه پیژومتری که موجود در منطقه کمتر از ۱ متر و مجذور میانگین خطاها در حدود یک متر به دست آمد که در مقایسه با نتایج اجرای منفرد مدل MODFLOW مقادیر کمتری است. نتایج کلی این کاربرد نشان داد که استفاده از نتایج حاصل از مدل سطحی SWAT در مدل آب زیرزمینی دشت سیلاخور کارایی مناسبی در افزایش دقت شبیه سازی در ماه های با بارش زیاد دارد. با این کاربرد، مدل آب زیرزمینی دارای قطعیت بالاتری بوده و قابلیت مناسب تری برای به کارگیری برای مقاصد پیش بینی و مدیریت آبخوان خواهد داشت.

۵- مراجع

- [1] Harbaugh A.W., (2005), " MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process", U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16

Evaluation of the efficiency of using surface water simulation results to improve the accuracy of groundwater simulation

M.H. Kouchakzadeh¹, F. Nasiri Saleh^{2*}

1- M.Sc. of water engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Assist. Prof., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

nasiri_f@modares.ac.ir

Abstract:

This paper evaluates the efficiency of using surface water simulation results to improve the accuracy of groundwater simulation due to improving the accuracy of its input boundary conditions. The three most important data sets of boundary conditions in groundwater flow simulation are groundwater recharge, evapotranspiration rates and their regional distributions that little information is usually available about them. Moreover, the incorrect definition of these values can lead to uncertain groundwater modeling that is not applicable for groundwater resources management. In the most of previous studies done in Iran, percentage of the average regional precipitation and the local pan evaporation data (available from local weather stations) are used as the regional groundwater recharge and evapotranspiration rates, respectively but they have high uncertainty in their quantities and spatial distributions. In this research in order to solve this problem, the values of groundwater recharge and evapotranspiration rates and their regional distributions, obtained from SWAT modeling results, were used as the related input boundary conditions data in groundwater flow simulation using MODFLOW model. SWAT model is a comprehensive watershed model that calculates these values in each Hydrologic Response Unit (HRU). The study aquifer in this research was Silakhor shallow aquifer with the area of 590 km² located in Lorestan province of Iran. The annual water table depth in different locations of this aquifer had been reported from 0.75 to 40 meter. Using this approach for improving boundary conditions in groundwater simulation and its evaluation was carried out for first time in Iran. The SWAT model was run for a period of 7 years from 2002 to 2008. After calibration and verification of the model using hydrodynamic data of Silakhor and Tire-Doroud gauging stations, the values of groundwater recharge and evapotranspiration rates in each HRU were extracted. The MODFLOW model was run for the period of 9 months of 2009 using these simulated boundary conditions and the other required information. For comparison of the calculated values with the observed values of water table depths in the 20 piezometers for the period of 9 months of 2009, the Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Errors (MAE) were obtained 1m and less than 1m, respectively. In continuous of this research, the values of 5, 10 and 15 percent of regional average precipitation and the evaporation data in Silakhor pan evaporation gauging station were used as usual boundary condition for groundwater simulation using the MODFLOW model. For comparison of the simulated values of water tables depths obtained from this usual approach with the observed ones, the both of RMSE and MAE values were calculated more than 1 meter. Therefore this research showed that using integrated SWAT-MODFLOW models was more applicable in the groundwater simulation in the study aquifer.

Keywords: SWAT model, MODFLOW model, Boundary condition, Silakhor plain aquifer