

## مدل‌سازی یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی در مناطق متکی بر سیستم کشاورزی آبی با استفاده

### از مدل SWAT-MODFLOW

#### (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور)

عالیه سعادت پور<sup>۱</sup> - امین علیزاده<sup>۲\*</sup> - علی نقی ضیائی<sup>۳</sup> - عزیزا... ایزدی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵

#### چکیده

در سال‌های اخیر، مناطق خشک و نیمه خشک با مشکل تخلیه‌ی شدید منابع آب زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه از آن‌ها رو به رو شده‌اند. همچنین، آب سطحی و زیرزمینی در بسیاری از جوانب در ارتباط و تعامل مشترک بوده‌اند. بنابراین، پیشرفت جامع و طولانی مدت راهکارهای مدیریت آب جهت پیاده‌سازی روش‌هایی برای حل مشکلات خصوصاً در حوضه‌های بزرگ مقیاس، امری ضروری است. در تحقیق حاضر، چارچوب یک مدل تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی جهت تسریع مدیریت منابع آب در حوضه خشک و نیمه خشک نیشابور و تحت آبیاری متمرکز از آب زیرزمینی، ارائه شده است. مدل اخیراً توسعه یافته تلفیقی SWAT-MODFLOW به صورت روزانه، آب زیرزمینی پمپ شده را از مدل MODFLOW جهت آبیاری مزارع تحت کشت به مدل SWAT منتقل کرده و با نفوذ عمقی از زیر پروفایل خاک، به عنوان تغذیه به مدل MODFLOW وارد می‌کند. واسنجی مدل SWAT-MODFLOW برای ۹ سال (۲۰۰۹-۲۰۰۱) و صحت‌سنجی برای ۲ سال (۲۰۱۱-۲۰۱۰) با استفاده از نتایج مدل در ایستگاه‌های هیدرومتری آب سطحی و تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی آبخوان حوضه نیشابور به صورت روزانه انجام شد. نتایج نشان داد که در مرحله واسنجی رواناب ماهانه، ضرایب  $r$ -factor،  $p$ -factor،  $R^2$  و NS که به منظور ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب به کار برده شد، در خروجی حوضه به ترتیب حدود ۰/۳۶، ۰/۲۱، ۰/۸۵ و ۰/۸۴ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۸۳، ۰/۷۰ و ۰/۶۵ بوده است. بیشترین نرخ نفوذ در ماه‌های اسفند و بهمن و کمترین نرخ نفوذ در ماه‌های شهریور و مهر اتفاق افتاده است. همچنین از نظر توزیع مکانی، این مقدار تغذیه بیشتر در مخروط افکنه‌ها و مناطق آبرفتی اتفاق می‌افتد. با بررسی مقدار میانگین سطح ایستابی آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای دوره‌ی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ و برای ۴۸ چاه مشاهداتی مشخص شد که میزان خطا برای ۷۸٪ از نقاط، کمتر از ۲ متر می‌باشد و تنها ۳ چاه خارج از بازه  $\pm 15\%$  خطا قرار دارد. همچنین سطح ایستابی در سال‌های اخیر به شدت روند کاهشی نشان داده است که علت آن برداشت بی‌رویه آب از چاه‌ها در دوره مورد بررسی بوده است. به طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که مدل تلفیقی توسعه یافته SWAT-MODFLOW می‌تواند در سایر حوضه‌های خشک و نیمه خشک که آبیاری آن‌ها عمدتاً از آبخوان انجام می‌شود، استفاده گردد. علاوه بر این، این مدل می‌تواند جهت مطالعات مدیریت پایدار منابع آب در دهه‌های آینده مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آب سطحی، مدل تلفیقی، نیشابور، SWAT-MODFLOW

#### مقدمه

معمولاً به وسیله‌ی فعالیت‌های کشاورزی نظیر انحراف آب سطحی، پمپاژ آب زیرزمینی و آبیاری، می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای رژیم جریان‌های سطحی و زیرزمینی را تغییر دهد. درک درست رفتار پیچیده‌ی سیستم متقابل آب سطحی-زیرزمینی در مدیریت منطقه‌ای منابع آب بسیار مهم است و مدل‌سازی تلفیقی این سیستم، یک رویکرد توصیه شده می‌باشد (۴۱).

درک تغییرات زمانی- مکانی نفوذ در مدل‌سازی آب زیرزمینی به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک با آبیاری متمرکز بسیار مهم است. به عبارت دیگر تا زمانی که نرخ دقیق نفوذ تعیین نگردد، تأثیر برداشت آب زیرزمینی از آبخوان به درستی تعیین نخواهد شد و رفتار طولانی مدت آبخوان تحت سناریوهای مدیریتی مختلف به خوبی تخمین زده نخواهد شد (۴۷). همچنین نیاز به آگاهی از رفتار متقابل

اثر متقابل آب سطحی و آب زیرزمینی نقش مؤثری در سیستم هیدرولوژیکی به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک، ایفا می‌کند (۴۷ و ۱۷) زیرا تغییرات در مدیریت یا مصرف یکی بر موجودیت و مصرف دیگری تأثیر می‌گذارد (۱۳). این اثر متقابل

۱، ۲ و ۳- به ترتیب فارغ‌التحصیل دکتری، استاد و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد  
\* نویسنده مسئول: (Email: alizadeh@um.ac.ir)

۴- محقق، مرکز تحقیقات آب دانشگاه سلطان قابوس، مسقط، عمان  
DOI: 10.22067/jsw.v0i0.74658

آب سطحی و زیرزمینی می‌تواند منجر به بهینه‌سازی مصرف متقابل آب سطحی و زیرزمینی و بررسی تأثیر کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر تغییرات سطح آب زیرزمینی گردد. تاکنون روش‌های زیادی جهت تخمین رفتار متقابل آب سطحی-زیرزمینی در ابعاد متفاوت زمانی و مکانی ارائه و به کار برده شده‌اند که تعدادی از آن‌ها عبارت است از: GSFLOW (۲۶)، HydroGeoSphere (۷ و ۵۰)، ParFlow، MIKE SHE (۱۸)، MODHMS (۳۷)، SWATMOD (۴۵) و SWATMODFLOW (۴). مدل‌های معرفی شده تاکنون برای رسیدگی به مسائل مختلف منابع آب، از جمله مدیریت آبیاری (۳۹)، اثر متقابل آب سطحی و زیرزمینی (۲۱، ۳۵ و ۵۶)، کاربرد زمین و تغییرات اقلیمی (۱۸ و ۲۷)، کیفیت آب (۶) و غیره مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در میان مدل‌های سطحی، SWAT یک مدل مالکیت عمومی و نیمه توزیعی آکو هیدرولوژیکی و بر پایه فرآیندهای فیزیکی است (۳) که برجسته‌تر است و در مطالعات مختلفی به کار برده شده است. با این حال، عیب SWAT محدودیت‌های مفهومی قابل توجه در رابطه با شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی و ذخیره‌سازی در سیستم آبخوان است. با توجه به این محدودیت تلفیق این مدل با مدل آب زیرزمینی MODFLOW در سال‌های اخیر کاربردهای موفقیت آمیز گسترده‌ای داشته است. از جمله سوفو کلیوس و همکاران در سال ۱۹۹۹ (۴۵)، سوفو کلیوس و پرکینز در سال ۲۰۰۰ (۴۶)، منکینگ و همکاران در سال ۲۰۰۳ (۳۰)، گالیباتی و همکاران در سال ۲۰۰۶ (۱۴)، کیم و همکاران در سال ۲۰۰۸ (۲۴)، لو و سوفو کلیوس در سال ۲۰۱۱ (۲۵) و گازمن و همکاران در سال ۲۰۱۵ (۱۹) به تلفیق دو مدل SWAT و MODFLOW و شبیه‌سازی حوضه‌های مختلف پرداخته‌اند.

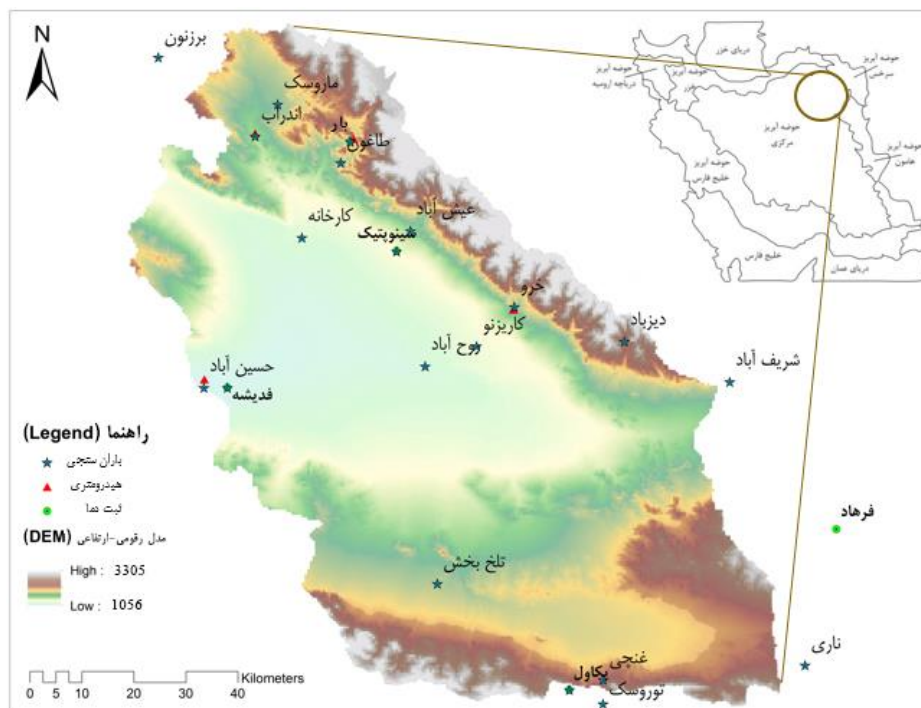
در جدیدترین تحقیق، بیلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW را با استفاده از کد جدیدی توسعه دادند و برای اتصال دو مدل از گام زمانی روزانه استفاده کردند. سپس با استفاده از مدل یکپارچه توسعه یافته به بررسی الگوهای زمانی و مکانی تخلیه آب زیرزمینی حوضه‌ای در آمریکا پرداختند. نتایج تغییرات مکانی شدیدی در تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه نشان داد که می‌تواند در مدیریت آب و مشخص کردن مناطق با قابلیت زیاد انتقال کودها به سمت رودخانه‌ها و در برنامه‌ریزی‌های اکولوژیک مورد استفاده قرار گیرد (۴). وی و همکاران در سال ۲۰۱۸ مدل تازه توسعه یافته SWAT-MODFLOW را به منظور شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌های محلول در یک سیستم زیرسطحی با رطوبت متغیر و از طریق اضافه کردن مدل RT3D به عنوان یک سابروتین در کد MODFLOW گسترش دادند (۵۵). چوون و همکاران در سال ۲۰۱۹ از مدل یکپارچه آب سطحی-آب زیرزمینی SWAT-MODFLOW برای مطالعه شرایط آب و هوایی و تأثیرات تغییر

اقلیم و برداشت از آب‌های زیرزمینی بر روی تعاملات آب سطحی-آب زیرزمینی مقیاس منطقه‌ای در غرب کانادا استفاده کردند (۱۱). علی‌یاری و همکاران در سال ۲۰۱۹ نسخه به روز شده SWAT-MODFLOW و عملکرد آن را در حوضه رودخانه پلت جنوبی در کولورادو آمریکا بررسی کردند. این نسخه امکان استفاده در حوضه‌های رودخانه‌ای در مناطق نیمه خشک را فراهم می‌کند (۱). مولینا-ناوارو و همکاران در سال ۲۰۱۹ از دو مدل SWAT و SWAT-MODFLOW به منظور شبیه‌سازی سناریوهای مختلف برداشت از آب زیرزمینی آبخوانی در کشور دانمارک و ارزیابی معایب و مزایای SWAT-MODFLOW استفاده کردند. در مجموع، مدل SWAT-MODFLOW امکان گسترده‌تری برای تجزیه و تحلیل آب زیرزمینی نشان داد و دیدگاه‌های بیشتری نسبت به SWAT در جهت حمایت از تصمیم‌گیری در رابطه با ارزیابی محیطی ایجاد می‌کند (۳۲). با توجه به اهمیت تأثیرات هیدرولوژیکی مصرف آب کشاورزی در زمینه‌ی مدل‌سازی یکپارچه و اهمیت دشت نیشابور به عنوان یکی از مهم‌ترین دشت‌های استان خراسان رضوی که نقش عمده‌ای در اقتصاد کشاورزی منطقه ایفا می‌کند، نیاز به انجام مدل‌سازی یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی در مناطق متکی بر سیستم کشاورزی آبی و درک بهتر توزیع زمانی و مکانی پارامترهای منابع آب که اطلاعات مفیدی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی در حوضه نیشابور در اختیار قرار خواهد داد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در این تحقیق، حوضه آبریز نیشابور می‌باشد که بخشی از حوضه آبریز کویر مرکزی ایران بوده و در بین عرض‌های شمالی ۳۵° ۴۰' تا ۳۹° ۳۶' و طول‌های شرقی ۵۸° ۱۳' تا ۳۰° ۵۹' قرار گرفته است. حداکثر ارتفاع این حوضه ۳۳۰۵ متر در شمال حوضه بوده که در کوهستان بینالود واقع شده و حداقل ارتفاع آن برابر ۱۰۵۶ متر در خروجی رودخانه اصلی در جنوب غربی حوضه و منطقه‌ی حسین آباد جنگل قرار گرفته است. وسعت حوضه بالغ بر ۹۱۵۷ کیلومتر مربع می‌باشد که حدود نیمی از آن را ارتفاعات (۴۲۴۱ کیلومتر مربع) و مابقی (۴۹۱۷ کیلومتر مربع) را دشت‌ها تشکیل می‌دهند (شکل ۱). میانگین دمای ماهانه در ایستگاه بار (معرف مناطق کوهستانی) ۱۳ درجه سانتی‌گراد و در ایستگاه محمدآباد - فدیشه (معرف مناطق دشتی) ۱۳/۸ سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین متوسط بارندگی و تبخیر سالانه حوضه به ترتیب حدود ۲۳۴ و ۲۳۳۵ میلی‌متر می‌باشد (۳۱). از آنجایی که اقلیم منطقه نیمه خشک تا خشک است، کشاورزی در دشت نیشابور بر پایه آبیاری و خصوصاً متکی بر منابع آب زیرزمینی می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز نیشابور در ایران و ایستگاه‌های مستقر در سطح حوضه  
Figure 1- Location of the Neishaboor's basin in Iran and its stations

شده و به مدل SWAT وارد گردید. لازم به ذکر است که محصولات گندم آبی و دیم به عنوان داده‌های مدیریت گیاهی برای دوره‌ی شبیه‌سازی، انتخاب شدند که مهم‌ترین دلیل برای انتخاب این محصولات، تناوب کشت ثابت این محصولات در طی دوره‌ی شبیه‌سازی می‌باشد. به علاوه آمار منابع تخلیه آب زیرزمینی (شامل چشمه، قنات و چاه‌های بهره برداری) برای محدوده‌ی حوضه نیشابور با توجه به بانک اطلاعاتی آمار مطالعات پایه منابع آب، تهیه گردید (۲۲ و ۲۳).

#### مدل SWAT

مدل SWAT (۳) که به طور گسترده در مباحث هیدرولوژیک کاربرد دارد، توسط USDA-ARS<sup>۳</sup> جهت شبیه‌سازی جریان آب، انتقال مواد غذایی و رسوب در مقیاس حوضه‌ای توسعه یافته است. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر روی مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در دراز مدت طراحی شده است. مدل SWAT یک

#### جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل‌ها

داده‌های مورد نیاز این تحقیق از منابع مختلف تهیه گردیده است به این ترتیب که نقشه‌ی رقومی ارتفاعی DEM با اندازه سلول ۹۰ متر، نقشه کاربری اراضی با دقت ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱۴ کلاس اصلی حاصل از گزارش‌های تفصیلی مدیریت حوضه آبریز از سازمان جهاد کشاورزی تهیه شد. همچنین نقشه‌ی واحدهای اراضی خاک با دقت ۱:۱۰۰،۰۰۰ و ۴۱ واحد ارضی از گزارش‌های تفصیلی خاکشناسی-آب‌خیزداری تهیه گردید. داده‌های مدل ارتفاعی رقومی DEM، کاربری اراضی و نوع خاک جهت تعیین و پارامتر کردن واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRU)<sup>۱</sup> استفاده شد. همچنین جهت تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی خاک شامل هدایت هیدرولیکی و رطوبت اولیه خاک از نرم‌افزار RetC<sup>۲</sup> (۵۳) استفاده گردید. علاوه بر این، داده‌های روزانه‌ی هواشناسی شامل بارندگی، دمای هوا (بیشینه، کمینه و میانگین)، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد، در یک دوره‌ی ۱۴ ساله (۲۰۱۱-۱۹۹۸) از ایستگاه‌های مستقر در سطح حوضه (ایستگاه سینوپتیک سازمان هواشناسی و نیز وزارت نیرو) اخذ

3- United States Department of Agriculture's Agricultural Research Service

1- Hydrologic Response Unit  
2- Retention Curve Computer Program

NWT جریان سه بعدی آب زیرزمینی و تمامی منابع و چشمه‌های مرتبط (مانند تغذیه، پمپاژ، بازگشت آب به زهکش‌ها و تعامل با شبکه‌ی رودخانه‌ها) را محاسبه می‌کند. کدهای هر دو مدل با یکدیگر در یک کد فورتین گردآوری شده‌اند و با هم در قالب یک واحد اجرا می‌شوند. پس از فراخوانی داده‌های ورودی برای هر دو مدل SWAT و MODFLOW، شبیه‌سازی از طریق فرایند تکراری روزانه‌ی محاسبات HRU در SWAT، انتقال داده‌ها به MODFLOW، اجرای MODFLOW، انتقال داده‌ها به SWAT و مسیریابی آب از طریق جریان شبکه حوضه، انجام می‌شود (۴).

مرحله‌ی اصلی در لینک کردن دو مدل SWAT و MODFLOW ورود نفوذ عمقی محاسبه شده توسط HRU (برای مثال آبی که در زیر پروفایل خاک موجود است) به عنوان تغذیه به سلول‌های شبکه<sup>۱</sup> MODFLOW می‌باشد. پس از تغذیه سلول‌ها، آب زیرزمینی به منظور کشاورزی توسط پمپاژ از سلول‌های شبکه MODFLOW به جریان ورودی SWAT واگذار می‌شود. با این هدف، SWAT حجم تغذیه حاصل از آبیاری و MODFLOW حجم جریان برداشت شده آب زیرزمینی توسط پمپاژ به زمین‌های کشاورزی را محاسبه می‌کند. شکل ۲ طرحواره مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW به همراه داده‌های ورودی هر دو مدل را نشان می‌دهد.

پکیج رودخانه در MODFLOW برای شبیه‌سازی حجم جریان مبادله‌ای نرخ جریان (نرخ تخلیه آب زیرزمینی یا نرخ نفوذ از رودخانه) بین آبخوان و شبکه‌ی رودخانه با استفاده از هدایت هیدرولیکی بستر رود و قانون داری استفاده می‌گردد. بنابراین، SWAT رواناب آب سطحی و جریان جانبی در خاک به شبکه‌ی جریان را تهیه می‌کند، در حالی که MODFLOW تخلیه‌ی جریان و نفوذ از رودخانه به آبخوان را برآورد می‌کند (۵۵).

در این روش مدل‌های SWAT و MODFLOW می‌توانند با ابعاد مختلف مکانی بهم پیوندند، یعنی یکی از مدل‌ها می‌تواند فراتر از مرزهای دیگر گسترش یابد. این امر به منظور تسهیل پیوند مدل‌های موجود، مانند مدل‌های آب زیرزمینی منطقه‌ای انجام می‌شود (۸، ۱۵، ۲۸، ۳۸ و ۴۲).

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها

به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل، مشاهدات ماهانه‌ی جریان سطحی (۲۰۱۱-۲۰۰۱) در چهار ایستگاه هیدرومتری اندرآب زرنده، بار اریه، خرو مجموع و حسین‌آباد جنگل جمع‌آوری گردید.

مدل شبیه‌ساز فرآیندهای سطحی در مقیاس حوضه می‌باشد که حوضه را به زیرحوضه‌هایی تقسیم می‌کند. زیر حوضه‌ها از لحاظ کاربری اراضی، خاک و شیب به واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRU) تقسیم شده و برای محاسبه توازن توزیع آب، مواد مغذی و رسوب استفاده می‌شوند. در واقع محاسبات در SWAT برای هر HRU انجام می‌گیرد و سپس خروجی‌ها بر اساس درصد سطح HRU در زیرحوضه تا خروجی حوضه توسعه می‌یابند. باید به این نکته توجه داشت که استفاده از مدل SWAT برای حوضه‌های آبریزی که در آن‌ها تخلیه‌ی آب‌های زیرزمینی اهمیت زیادی برای جریان دارد، غالباً مناسب نیست که دلیل آن، شبیه‌سازی ساده‌ی فرایندهای زیر سطحی توسط مدل می‌باشد (۹، ۱۶، ۴۰، ۴۸ و ۴۹). بنابراین استفاده از این مدل برای مناطق مذکور باید با احتیاط انجام شود.

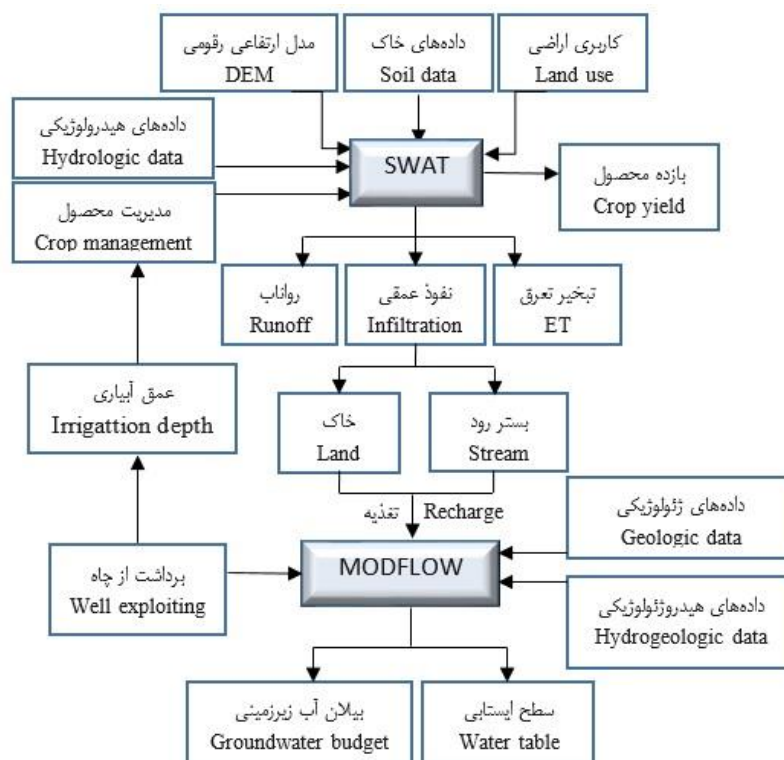
### مدل MODFLOW

MODFLOW (۲۹) مدل شبیه‌ساز سه بعدی جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل می‌باشد. این مدل به دلیل قابلیت و اعتبارسنجی گسترده‌ی آن در شبیه‌سازی سیستم‌های مختلف، به عنوان یک مدل استاندارد شبیه‌ساز جریان آب زیرزمینی در سراسر جهان پذیرفته شده است. اخیراً الگوریتم جدیدی به MODFLOW اضافه شده (قابلیت حل مسائل مبتنی بر نیوتن) که باعث می‌شود مدل بهتر از قبل، خالص‌سازی غیرخطی و رطوبت مجدد سلول‌های شبکه در سیستم‌های آب زیرزمینی غیرقابل کنترل را شبیه‌سازی کند (مشکلی که در نسخه‌های قدیمی‌تر مدل حل نشده باقی مانده بود) (۳۶). گرچه مدل MODFLOW قابلیت شبیه‌سازی فرایندهای مختلف شامل تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی، نفوذ منطقه غیر اشباع (۳۴)، تبخیر تعرق، پمپاژ، تخلیه به زهکش‌های زیرسطحی و اثر متقابل رودخانه و آبخوان را داراست، با این حال، کاربرد مدل محدود به بررسی مدیریت و تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و اثر متقابل منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود. چرا که قادر نیست فرایندهای سطحی از جمله اثر متقابل زمین-اتمسفر، نفوذ و رواناب سطحی، چرخه و حرکت مواد غذایی، رشد گیاه و تأثیرات تمرین‌های مدیریتی بر سیستم‌های کشاورزی را شبیه‌سازی کند.

### مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW

در این مطالعه، چارچوب توسعه یافته‌ی مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW با استفاده از ترکیب کردن آخرین نسخه‌ی مدل‌های SWAT 2012 و MODFLOW-NWT مورد استفاده قرار گرفت. در این چارچوب، SWAT کلیه‌ی فرایندهای مرتبط با سطح زمین، رشد گیاه، جریان رود و فرایندهای ناحیه‌ی خاک و MODFLOW-

1- Grid cells of MODFLOW



شکل ۲- طرح‌واره ورودی‌های مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW و اثر متقابل مدل‌های SWAT و MODFLOW

Figure 2- Diagram showing the SWAT-MODFLOW integrated model input data and SWAT and MODFLOW interactions

factor معیارهایی برای کمی کردن عدم قطعیت موجود در مدل‌های p-factor مفهومی، پارامترها و همچنین داده‌های ورودی می‌باشند. بیانگر درصد داده‌های اندازه‌گیری شده است که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار می‌گیرند همچنین r-factor کوچکتر از یک (ضریب  $R^2$  ضریب ضریب) معمولاً نتیجه‌ی واسنجی خوبی را نشان می‌دهد. ضریب  $R^2$  تشخیص، تبیین یا تعیین) نشان‌دهنده همخوانی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با استفاده از روش تجزیه رگرسیونی است و دامنه آن بین صفر تا یک است. مقادیر بیشتر نشان دهنده واریانس خطای کمتر بوده و معمولاً مقادیر بیش از ۰/۵ قابل قبول در نظر گرفته می‌شود (۴۳). آماره‌ی ضریب نش‌ساتکلیف (NS) تعیین کننده مقدار نسبی واریانس باقیمانده به واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده بوده و مقدار نزدیک تر آن به عدد ۱، نشان‌دهنده کارایی بالاتر مدل مربوطه خواهد بود. خطای میانگین مربعات (MSE)، شاخص ارزشمند نشان‌دهنده خطا در واحد مربع آن پارامتر است که در تجزیه و تحلیل نتایج کمک می‌کند. مقدار صفر MSE نشان‌دهنده برآزش عالی می‌باشد.

از داده‌های ۹ سال ابتدایی برای واسنجی و ۲ سال آخر برای صحت‌سنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI2 در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP استفاده شد. همچنین اندازه‌گیری‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی (۲۰۱۱-۲۰۰۱) در ۴۸ چاه مشاهداتی برای واسنجی مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور تنظیم شرایط اولیه برای شبیه‌سازی شرایط ناپایدار ابتدا پارامترهای اصلی آب زیرزمینی (به عنوان مثال، هدایت هیدرولیکی) تنظیم شد. سپس مدل SWAT-MODFLOW برای دوره‌ی ۱۴ ساله (۲۰۱۱-۱۹۹۸) و با گام زمانی روزانه اجرا گردید. داده‌های سه سال اول این دوره (۲۰۱۱-۱۹۹۸) به منظور سازگاری مدل با شرایط موجود و تعیین ذخیره‌سازی اولیه‌ی منطقی خاک (۲۱)، مورد استفاده قرار گرفت<sup>۱</sup> و بنابراین در واسنجی استفاده نگردید. در نهایت واسنجی مدل تلفیقی به صورت دستی و از طریق سعی و خطا انجام گرفت. آماره‌های استفاده شده برای واسنجی در این مطالعه عبارت است از r-factor،  $R^2$ ،  $NS^2$ ، MSE و p-factor. مقادیر r-factor و p-factor

3- Nash-Sutcliffe  
4- Mean Square Error

1- Warm-up  
2- Coefficient of determination

### مراحل اجرای مدل‌سازی تلفیقی

به منظور اجرای مدل‌سازی تلفیقی، در این مطالعه محدوده‌ی سطحی مدل SWAT به ۲۴۸ زیرحوضه و ۶۵۷۹ HRU تقسیم‌بندی گردید (شکل ۳-الف). محدوده‌ی زیرسطحی از یک لایه با ۲۰۲۴۰ سلول فعال (۱۷۶ سلول افقی و ۱۱۵ سلول عمودی) تشکیل شده است (شکل ۳-ب). این محدوده به ۲۴ زون برای پارامتر کردن مدل تقسیم گردید (۳۳). شرایط مرزی مدل‌سازی آبخوان مشابه مطالعه‌ی ایزدی و همکاران (۲۳) در نظر گرفته شده است. محدوده‌های شمال و شمال شرقی و بخشی از جنوب و جنوب غربی مرزهای زیرزمینی دارای شرایط مرزی با بار مشخص<sup>۱</sup> می‌باشند که جریان آب زیرزمینی را به ترتیب از کوه‌های بینالود در شمال، ارتفاعات لیلاجوق و یال پلنگ در شرق و تپه ماهورهای نیزه‌بند، سیاه کوه و کوه نمک در جنوب دریافت کرده و از مرزهای حسین‌آباد در جنوب غربی از آبخوان خارج می‌کنند. هد اولیه‌ی مرزی براساس ارتفاع ایستابی آب زیرزمینی مشاهده‌ای نزدیک مرز تخمین زده شده است. شرایط بدون جریان نیز به عمده‌ی مرزهای زیرزمینی جنوب غربی و شمال غربی اعمال شده است. اطلاعات سطح مقطع رودها از نتایج SWAT استخراج شده و با استفاده از نرم‌افزار Google earth بررسی گردید. بعد از جمع‌آوری همه‌ی داده‌های مورد نیاز، مدل با استفاده از ابزارهای خارجی شامل ArcGIS و ModelMuse راه‌اندازی شد.

### نتایج و بحث

#### واسنجی مدل SWAT

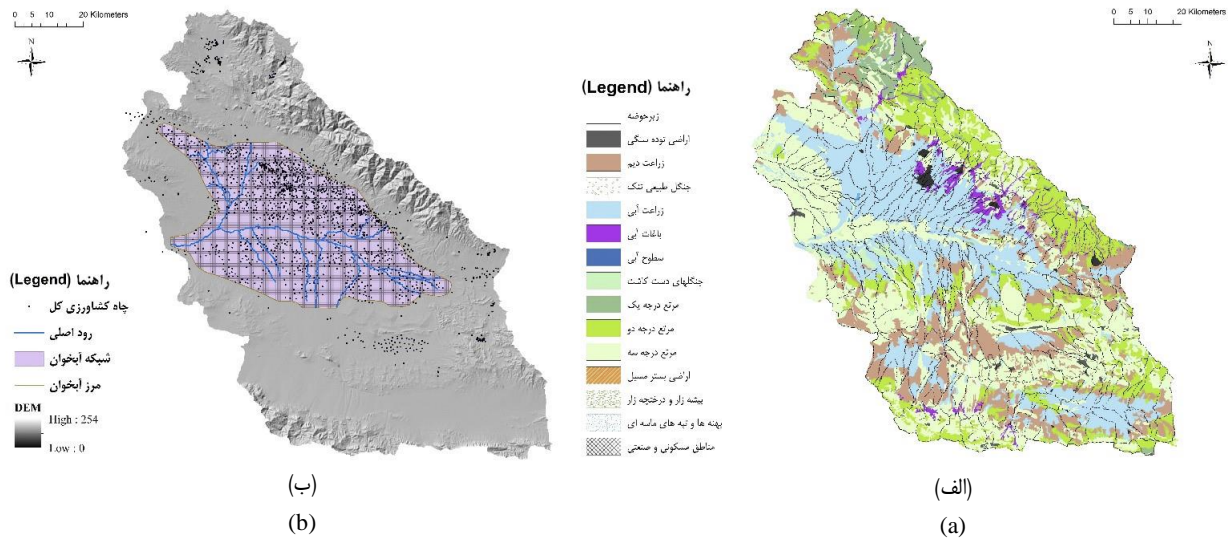
با توجه به مطالعات پیشین و تحلیل حساسیت مطلق توسط SWAT-CUP، تعداد ۲۴ پارامتر حساس برای حوضه نیشابور مشخص شد. جدول ۲ نوع پارامتر، حدود اولیه و نهایی آن‌ها را در واسنجی نشان می‌دهد. نتایج واسنجی مدل برای ۹ سال در دوره آماری ۲۰۰۹-۲۰۱۱ و اعتبارسنجی (اعداد داخل پرانتز) مدل برای ۲ سال در دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۱۰، برای ۴ ایستگاه هیدرومتری حوضه نیشابور در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در شکل ۴ مقایسه هیدروگراف رواناب داده‌های مشاهده‌ای، رواناب شبیه‌سازی و باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۱ محدوده تغییرات پارامتر r-factor حاصل از واسنجی رواناب ماهیانه در چهار ایستگاه هیدرومتری بین ۰/۰۶ تا ۰/۲۱ است. مقادیر r-factor کوچکتر از یک عموماً بیانگر نتیجه‌ی واسنجی خوب مدل می‌باشد. از طرفی چنانچه مشاهده می‌شود در بیشتر ایستگاه‌ها، مقدار p-factor کم بوده که نشان‌دهنده عدم

قطعیت زیاد در شبیه‌سازی است. یکی از دلایل کم بودن مقادیر p-factor این است که در اکثر ایستگاه‌ها جریان پایه توسط مدل کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی شده است (شکل ۴). علت اصلی این موضوع، عدم دسترسی به اطلاعات کافی مقادیر آب برداشتی از رودخانه‌ها بوده است که منجر به عدم قطعیت نسبتاً بزرگ در نتایج مدل‌سازی خواهد شد (۲). همچنین با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که مدل زمان رسیدن به حداکثر رواناب را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. علاوه بر این جدول ۱ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار ضریب نش-ساتکلیف (NS) در خروجی حوضه (ایستگاه حسین‌آباد جنگل) ۰/۸۴ است و این مقدار هر چه بیشتر به عدد یک نزدیک باشد نشان از رضایت‌بخش بودن شبیه‌سازی انجام شده توسط مدل دارد. مقادیر ضریب همبستگی  $R^2$  بین ۰/۵ تا ۰/۸۵ قرار گرفته است که کمترین آن مربوط به ایستگاه خرو مجموع و بیشترین آن مربوط به حسین‌آباد جنگل (خروجی حوضه آبریز) است. به طور کلی با توجه به قابل قبول بودن معیار NS، پایین بودن مقادیر خطا (MSE, r-factor) و بالا بودن مقادیر همبستگی ( $R^2$ ) در برآورد رواناب در ایستگاه‌های هیدرومتری می‌توان گفت که مدل در توانسته است به خوبی هیدروگراف مشاهده‌ای را به خصوص در مقیاس ماهانه تولید کند.

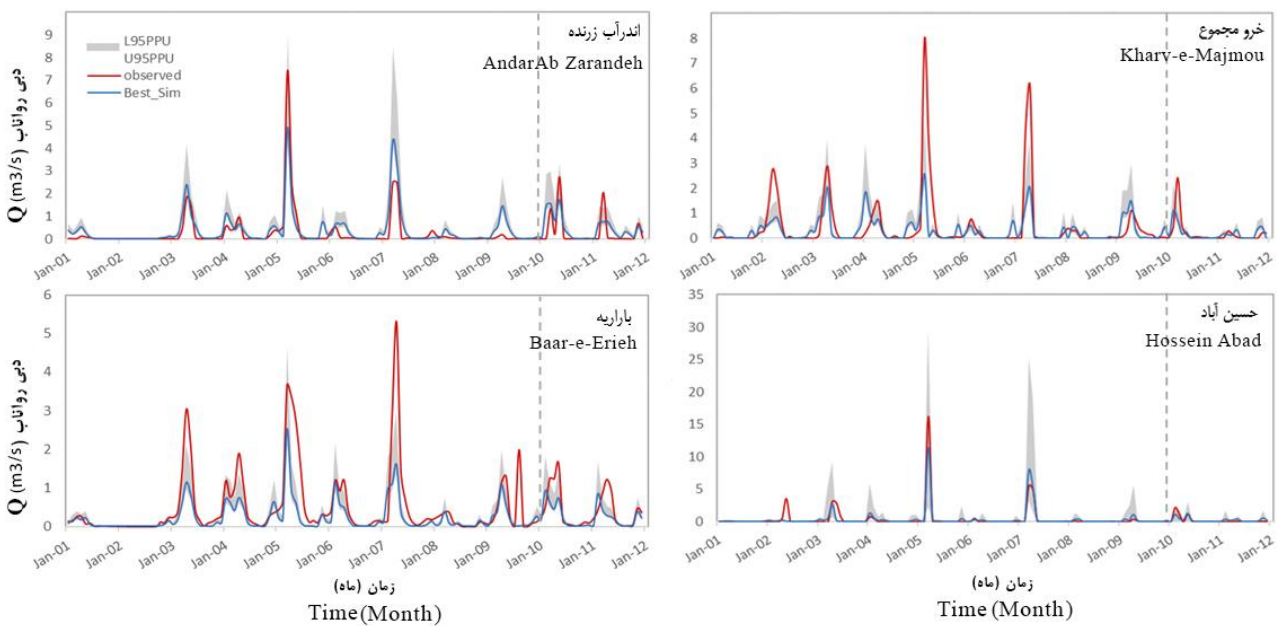
در مرحله اعتبارسنجی رواناب ماهانه، محدوده پارامتر p-factor بین ۴ و ۲۹ درصد به دست آمد که به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های اندراب زرنده و حسین‌آباد جنگل است (جدول ۱). لازم به ذکر است که بر اساس جدول ۱ مقادیر r-factor در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از یک بوده است. ضریب  $R^2$  بدست آمده در مرحله اعتبارسنجی رواناب ماهانه بین ۰/۳۴ تا ۰/۷ به ترتیب متعلق به ایستگاه خرو مجموع و حسین‌آباد جنگل می‌باشد. همچنین طیف ضریب نش-ساتکلیف بدست آمده در مرحله اعتبارسنجی بین ۰/۳۱ تا ۰/۶۵ است که کمترین و بیشترین مقدار آن به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های بار اریه و حسین‌آباد جنگل می‌باشد. اعتبارسنجی جریان نشان می‌دهد که مدل بهترین نتایج را برای ایستگاه هیدرومتری خروجی حوضه (حسین‌آباد جنگل) شبیه‌سازی می‌کند.

در مدل MODFLOW مقدار واقعی تغذیه آب زیرزمینی جزء مقادیر ورودی بوده که باید به مدل وارد شود. برآورد مناسب این کمیت دشوار بوده و دارای عدم قطعیت زیاد است. لذا برای افزایش دقت مدل تلفیقی، مقدار نفوذ عمقی یا تغذیه به صورت مستقیم از مدل آب سطحی SWAT جایگزین بسته‌ی تغذیه مدل آب زیرزمینی MODFLOW می‌شود، لذا واسنجی مدل آب زیرزمینی در قالب واسنجی مدل تلفیقی انجام می‌شود.



شکل ۳- (الف) نقشه‌ی کاربری اراضی و زیرحوضه‌های دشت نیشابور در مدل SWAT و (ب) موقعیت ایبخوان در حوضه‌ی نیشابور و شبکه‌ی ایبخوان و موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و رود اصلی حوضه در مدل MODFLOW

Figure 3- (a) Land use map and Neishaboob plain sub-basins in SWAT and (b) Location of Neishaboob aquifer in the watershed and Modflow grid and the location of agriculture wells and Main River in the model

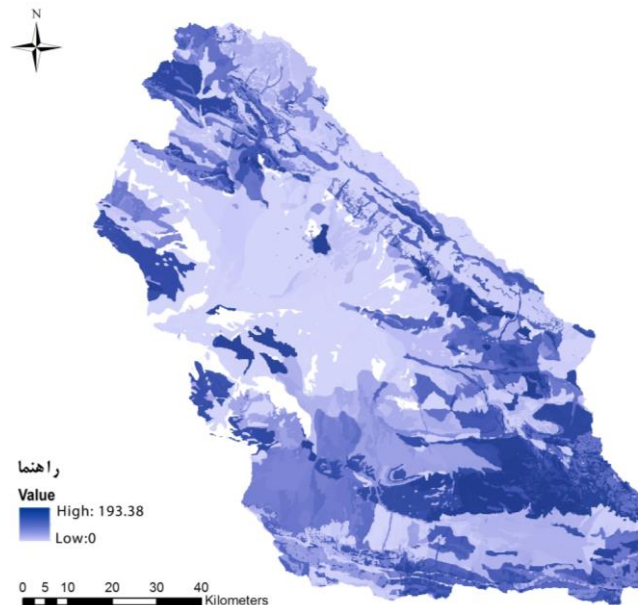


شکل ۴- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده رواناب ماهیانه و باند عدم قطعیت دبی شبیه‌سازی شده (قسمت خاکستری رنگ) در دوره واسنجی (اول سال میلادی ۲۰۰۱ تا انتهای سال میلادی ۲۰۰۹) و صحت‌سنجی (اول سال میلادی ۲۰۱۰ تا انتهای سال میلادی ۲۰۱۱) در چهار ایستگاه هیدرومتری اندرآب، بار اریه، خرو مجموع و حسین آباد جنگل

Figure 4- Comparison between simulated and observed monthly discharges and simulated discharge uncertainty band (gray) in calibration period (1/2001-12/2009) and validation (1/2010-12/2011) for four hyrometric station (AndarAb, Bar Erieh, Kharv Majou, HosseinAbad Jangal)

جدول ۱- مقادیر آماره‌های ارزیابی مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW برای دوره‌ی واسنجی (صحت‌سنجی)  
Table 1- The value of statistics for the calibration (validation) period

ایستگاه Station	MSE	R <sup>2</sup>	NS	p-factor	r-factor
اندرآب زرنده Andarab Zarandeh	2.3(2.8)	0.72(0.47)	0.7(0.43)	0.13(0.04)	0.09(0.13)
بار اریه Baar Erieh	5.2(1.6)	0.71(0.46)	0.38(0.31)	0.1(0.08)	0.06(0.1)
خرو مجموع Kharv-e-Majmou	8.6(1.6)	0.5(0.34)	0.39(0.34)	0.06(0.13)	0.06(0.1)
حسین‌آباد جنگل Hossein Abad-e-Jangal	4.8(9.5)	0.85(0.7)	0.84(0.65)	0.36 (0.29)	0.21(0.83)



شکل ۵- تغییرات مکانی نفوذ متوسط سالانه (میلی‌متر) در حوضه‌ی نیشابور (شبیه‌سازی شده توسط مدل سطحی SWAT)

Figure 5 -Spatial variations of annual mean percolation (mm) in Neishaboob watershed (simulated by SWAT model)

واسنجی دستی و از طریق تغییر پارامترهای هیدرولیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی (K) و آبدهی ویژه (Sy) در مدل MODFLOW انجام گرفت تا خروجی مدل تلفیقی برای بدست آوردن بهترین تطابق سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده با مقدار مشاهده‌ای واسنجی گردد. سپس به کمک نرم افزار PEST و روش حل معکوس، واسنجی خودکار گردید.

#### بررسی تغییرات سطح ایستابی

در شکل ۶ تغییرات جریان آبخوان در دوره ۲۰۱۱-۲۰۰۱ و تغییرات زمانی سطح ایستابی آب زیرزمینی در ۴ چاه انتخابی مشاهداتی در سطح دشت نیشابور نشان داده شده است.

در شکل ۵، مقادیر نفوذ عمقی متوسط سالانه (میلی‌متر)، که از مقادیر نفوذ روزانه‌ی محاسبه شده مدل SWAT به مدل MODFLOW وارد شده، نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، بیشترین نرخ نفوذ مربوط به قسمت ابرفتی دامنه‌ی ارتفاعات دشت نیشابور به خصوص در شمال و جنوب شرقی حوضه می‌باشد. در واقع با توجه به ویژگی‌های دانه‌بندی ابرفتی در دامنه ارتفاعات حاشیه و تعدد مسیل‌های منتهی به دشت در این نواحی، بخش قابل توجهی از جریان‌های سیلابی صرف تغذیه آبخوان در این مناطق می‌گردد. بیشترین میزان نفوذ به ترتیب در ماه‌های اسفند و بهمن و کمترین میزان آن در شهریور و مهر اتفاق افتاده است.

#### واسنجی مدل SWAT-MODFLOW

به منظور واسنجی مدل تلفیقی در ابتدا بر روی پارامترهای مدل

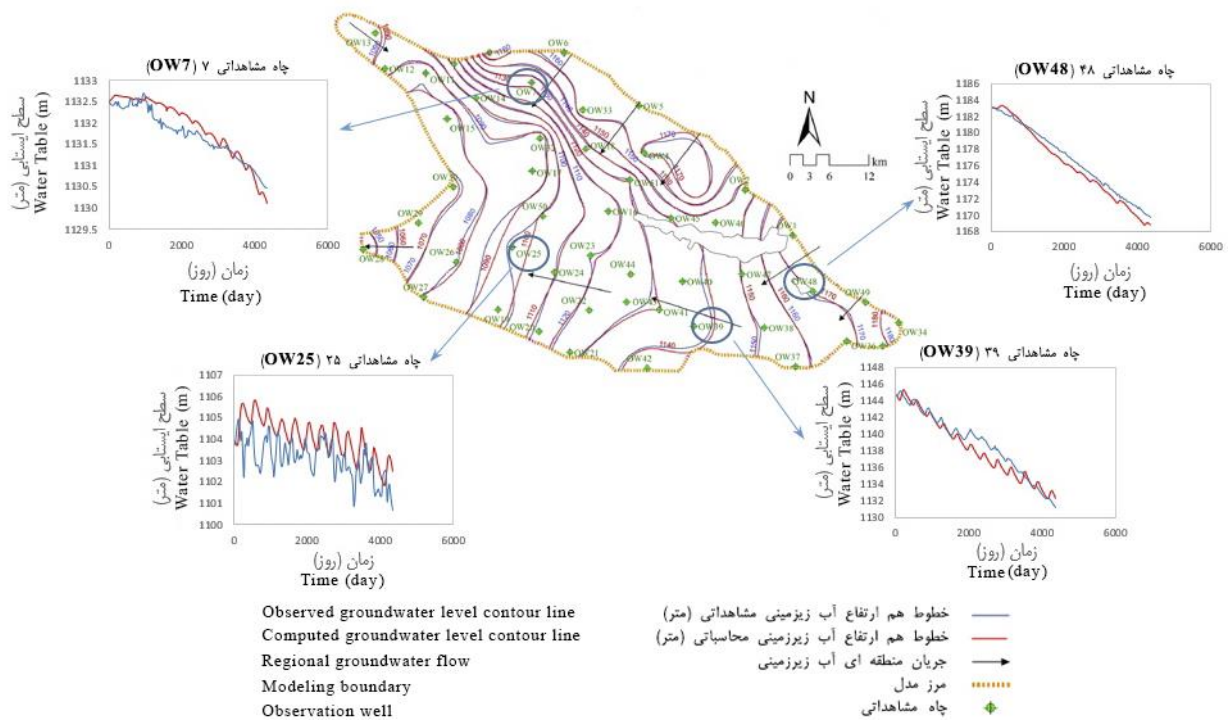


جدول ۲- پارامترهای نهایی انتخاب شده در فرآیند واسنجی مدل SWAT، حدود اولیه، نهایی و مقدار حساسیت آنها

Table 2- Final selected parameters with first and final ranges and their sensitivity in SWAT calibration process

پارامتر	توضیحات	t-stat	p-value	محدوده اولیه	محدوده نهایی
v__CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی آبراهه اصلی (میلی‌متر بر ساعت) Effective hydraulic conductivity of channel (mm/hr)	7.81	0	[ 5,40 ]	[29.94,40]
r__CN2.mgt	شماره منحنی Curve number	-4.03	0.00006	[-0.6,0.6]	[0.41,0.55]
v__GW_DELAY.gw	زمان تأخیر تغذیه آب زیرزمینی (روز) Delay time for aquifer recharge (days)	2.17	0.03	[50,150]	[92.102,141.66]
v__CH_N2.rte	ضریب مانینگ آبراهه اصلی در هر زیرحوضه Manning's n value for the main channel	1.98	0.04	[0,0.3]	[0.097,0.195]
r__SOL_AWC().sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (میلی‌متر بر میلی‌متر) Available water capacity (mm/mm)	1.66	0.1	[-0.5,-0.3]	[-0.34,-0.21]
r__SOL_BD().sol	چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Moist bulk density (g/cm3)	-1.47	0.14	[-0.6,-0.5]	[-0.535,-0.526]
v__ALPHA_BNK.rte	ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی برای بستر رود Bank flow recession constant	1.42	0.15	[0.1,1]	[0.42,0.76]
r__SOL_Z().sol	عمق خاک (میلی‌متر) Depth from soil surface to bottom of layer (mm)	1.12	0.26	[-0.6, 0.6]	[-0.49,-0.38]
v__GWQMN.gw	حداقل مقدار جریان در آبخوان برای جریان پایه (mm H <sub>2</sub> O) Threshold water level in shallow aquifer for base flow	0.9	0.37	[0,1000]	[189.78,569.67]
r__SOL_K().sol	هدایت هیدرولیکی خاک (میلی‌متر بر ساعت) Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	-0.86	0.39	[-0.4,0.4]	[-0.26,-0.18]
v__ESCO.hru	ضریب تصحیح تبخیر از خاک Soil evaporation compensation coefficient	-0.83	0.4	[0.01,1]	[0.76,0.87]
v__GW_REVAP.gw	ضریب "Revap" Groundwater revap coefficient	0.69	0.49	[0.02,0.1]	[0.05,0.08]
v__REVAPMN.gw	آستانه عمق آب در آبخوان کم عمق (mm H <sub>2</sub> O) Threshold water level in shallow aquifer for revap	-0.68	0.5	[5,7]	[5.26,6.42]
v__SLSUBBSN.hru	متوسط طول شیب (متر) Slope length (m)	0.58	0.56	[10,150]	[73.83,110]
v__EPCO.hru	ضریب تصحیح جذب آب از خاک توسط گیاه Plant uptake compensation factor	-0.41	0.68	[0.01,1]	[0.88,0.96]
v__ALPHA_BF.gw	ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی Baseflow recession constant	0.02	0.99	[0,1]	[0.07,0.69]
v__SMTMP.bsn	دمای ذوب توده برف (سلسیوس) Snow melt base temperature (C)	-21.2	0	[-5,5]	[2.1,4.9]
v__SMFMX.bsn	عامل ذوب برف در ۲۱ جولای Snow melt factor on June 21 (mmH <sub>2</sub> O/day-C)	-17.2	0	[1.4,6.9]	[3.3,6.9]
v__TRNSRCH.bsn	تلفات انتقال آب Fraction of transmission partitioned to the deep aquifer	4.28	0.00002	[0,1]	[0.8,1]
v__SFTMP.bsn	دمای برف (سلسیوس) Snowfall temperature(C)	3.33	0.0009	[-5,5]	[3,4.1]
v__TIMP.bsn	ضریب تأخیر دمای توده برف Snow pack temperature lag factor	0.87	0.387	[0.01,1]	[0.85,1]
v__SURLAG.bsn	ضریب تأخیر رواناب سطحی Surface runoff lag coefficient	0.82	0.412	[1,24]	[14.6,17.2]
v__SMFMN.bsn	عامل ذوب برف در ۲۱ دسامبر Snow melt factor on December 21 (mmH <sub>2</sub> O/day-C)	-0.69	0.489	[1.4,6.9]	[1.5,2.5]
v__FFCB.bsn	ذخیره اولیه آب خاک Initial soil water storage	-0.63	0.529	[0,1]	[0.25,0.65]

v و t نشان‌دهنده تغییرات مطلق (جایگزین مقادیر پارامتر) و نسبی (ضرب در مقادیر پارامتر به صورت درصد) می‌باشند. در حالت نسبی مقدار اصلی پارامتر در (محدوده نهایی پارامتر +) ضرب می‌شود. مقدار t بیانگر حساسیت (هر چه مقدار آن بزرگ‌تر، میزان حساسیت بیش‌تر) و مقدار P معنی‌داری (هر چه کوچک‌تر، میزان معنی‌داری بیش‌تر) پارامتر را نشان می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات جریان آبخوان و تغییرات زمانی سطح ایستابی آب زیرزمینی در ۴ چاه انتخابی مشاهداتی، مقایسه‌ی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و محل قرارگیری چاه‌ها

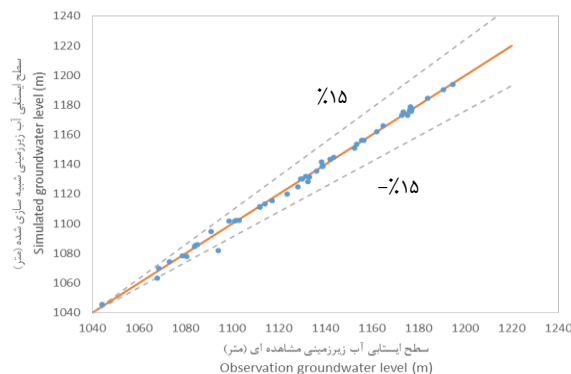
Figure 6- Temporal variation of groundwater level at four selected observation wells, comparison between the model simulation and observations; and the location of the wells

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل آب سطحی SWAT و مدل آب زیرزمینی MODFLOW در قالب یک مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW به منظور مدل‌سازی بهتر آب مصرفی کشاورزی، به کار گرفته شد. این مدل تلفیقی دارای مزیت‌های متعددی نسبت به سایر نسخه‌های قبلی (۱۰، ۱۴، ۲۴، ۲۵ و ۴۶) می‌باشد. به عنوان مثال، می‌توان به مواردی همچون وجود واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) دارای موقعیت جغرافیایی، توانایی در استفاده از مدل‌های SWAT و MODFLOW با گستردگی‌های متفاوت مکانی، استفاده از فرمول نیوتن MODFLOW-NWT (۳۶) برای حل مطلوب سناریوهای مربوط به خشک شدن و خیس شدن مجدد غیرخطی معادله‌ی جریان نامحدود آب زیرزمینی و در نهایت قابلیت دسترسی آزاد آن برای عموم، اشاره نمود.

به طور کلی شکل ۶ گویای این مطلب است که جریان در آبخوان در دوره مورد مطالعه از سمت شرق به سمت غرب یعنی به سمت خروجی آبخوان در حال حرکت بوده است. با مقایسه‌ی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در چاه‌های منتخب، مشاهده می‌شود که مدل SWAT-MODFLOW، روند اصلی زمانی سطح ایستابی را به خوبی تشخیص می‌دهد. همچنین نمودارهای سری زمانی چاه‌های منتخب نشان‌دهنده روند کاهش قابل وضوح سطح ایستابی آب زیرزمینی می‌باشند. به عنوان مثال در شکل ۶ نمودار مربوط به چاه شماره ۴۸ نشان می‌دهد که کاهش سطح ایستابی این دوره یازده ساله (۲۰۱۱-۲۰۰۱) بیش از ۱۴ متر بوده است.

در شکل ۷ مقدار میانگین سطح ایستابی آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW برای دوره‌ی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ و برای ۴۸ چاه مشاهداتی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همه‌ی نقاط نزدیک به خط ۴۵ درجه هستند و انحراف از خط برای ۷۸٪ از نقاط کمتر از ۲ متر است. با توجه به این شکل فقط ۳ چاه در خارج از بازه خطای  $\pm 15\%$  قرار گرفته‌اند. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که مدل توانسته به خوبی خصوصیات دراز مدت سطح ایستابی آب زیرزمینی منطقه‌ای را پیش‌بینی کند.



شکل ۷- مقایسه‌ی میانگین سطح ایستابی آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT-MODFLOW برای دوره‌ی ۲۰۱۱-۲۰۰۱

(هر نقطه نشان‌دهنده‌ی یک چاه از ۴۸ چاه مشاهده‌ای است)

Figure 7- Comparison of the observed and simulated mean groundwater level by SWAT-MODFLOW for the period of 2001-2011  
(Each circle represents one of the 48 observation wells)

آب‌های زیرزمینی در ۴۸ چاه مشاهده‌ای می‌تواند به پمپاژ زیاد بسیار حساس باشد. بنابراین، همانطور که در فرآیند واسنجی نشان داده شده است، اگر اثر انحراف آب و پمپ کردن به درستی در نظر گرفته نشده باشد، دستیابی به نتایج رضایت بخش غیر ممکن خواهد بود. علاوه بر این نتایج این تحقیق نشانگر کاهش سطح ایستابی آب زیرزمینی حوضه نیشابور به دلیل برداشت بیش از حد از آبخوان جهت کشاورزی می‌باشد. از آن جا که آب زیرزمینی نقش حیاتی در پایداری اکوسیستم دارد، کاهش آن باعث ایجاد مشکلات خطرناک محیطی و اکولوژیکی خواهد شد. همچنین با توجه به این که، سیستم کشاورزی حوضه آبریز نیشابور مبتنی بر آبیاری است، از این رو، فرایندهایی که مؤلفه‌های بیلان آب را در یک حوضه کشاورزی تحت تأثیر قرار می‌دهند به شدت متأثر از مدیریت گیاه می‌باشند. به طور کلی نتایج این تحقیق منجر به ایجاد درک عمیق‌تری در مورد الگوهای مکانی آب‌های زیرزمینی در دشت نیشابور شد، که می‌تواند در ارائه و کاربرد طرح‌های مدیریت آبیاری و تعامل مشترک آب سطحی و آب‌های زیرزمینی کمک کند.

در این تحقیق، مدل SWAT-MODFLOW با استفاده از کد یکپارچه‌ی نوین مدل‌سازی در منطقه در برابر جریان رودخانه برای چهار ایستگاه مستقر در سطح حوضه و نیز داده‌های ۴۸ چاه مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی، مورد واسنجی قرار گرفت که نتایج نشان از کارایی مطلوب مدل داشت. البته باید به این نکته توجه داشت که علاوه بر آماره‌های استفاده شده در این مطالعه، معیارهای دیگری جهت برآورد کمی و کارایی بهتر مدل وجود دارد (۴) و همچنین روند واسنجی در این مطالعه یک روش دقیق برای تخمین نمی‌باشد. با این وجود، اطمینان ما بر عملکرد مدل بر اساس دو واقعیت زیر است. اول، هر دو مدل SWAT و MODFLOW (SWAT-MODFLOW) مدل‌های خوبی هستند و دوم، اساس نظری و عملکرد عددی آنها در بسیاری مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است.

به طور کلی این مطالعه با هدف ارزیابی مناسب بودن و مزایای ایجاد یک مدل یکپارچه، به جای دو مدل مجزا انجام شده است. هیدروگراف‌ها در چهار ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه تا حد زیادی تحت تأثیر عملیات برداشت از بالادست قرار خواهد گرفت و دینامیک

## منابع

- 1- Aliyari F., Bailey R.T., Tasdighi A., Dozier A., Arabi M., and Zeiler K. 2019. Coupled SWAT-MODFLOW Model for Large-Scale Mixed Agro-Urban River Basins. Environmental Modelling and Software.
- 2- Alizadeh A., Izady A.A., Davari K., Ziaei A.N., Akhavan S., and Hamidi Z. 2013. Estimation of Actual Evapotranspiration at Regional – Annual scale using SWAT. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 2(7): 243-254. (In Persian with English abstract)
- 3- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., and Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc. 34(1): 73-89.
- 4- Bailey R.T., Wible T.C., Arabi M., Records R. M., and Ditty J. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. Hydrol.

- Process 30: 4420–4433.
- 5- Bennett N.D., Croke B.F.W., Guariso G., Guillaume J.H.A., Hamilton S.H., Jakeman A.J., Marsili-Libelli S., Newham L.T.H., Norton J.P., Perrin C., Pierce S.A., Robson B., Seppelt R., Voinov A.A., Fath B.D., and Andreassian V. 2013. Characterising performance of environmental models. *Environ. Model. Softw.* 40: 1-20.
  - 6- Borah D.K., and Bera M. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases. *Trans. ASAE* 46(6): 1553-1566.
  - 7- Brunner P., and Simmons C.T. 2012. HydroGeoSphere: a fully integrated, physically based hydrological model. *Ground Water* 50(2): 170-176.
  - 8- Christenson S., Osborn N.I., Neel C.R., Faith J.R., Blome C.D., Puckette J., and Pantea M.P. 2011. Hydrogeology and Simulation of the Groundwater Flow in the Arbuckle-Simpson Aquifer, South-Central Oklahoma. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5029.
  - 9- Chu T.W., and Shirmohammadi A. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the Piedmont physiographic region of Maryland. *Trans. ASABE* 47(4): 1057-1073.
  - 10- Chung I., Kim N., Lee J., and Sophocleous M. 2010. Assessing Distributed Groundwater Recharge Rate Using Integrated Surface Water-Groundwater Modelling: Application to Mihocheon Watershed, South Korea. *Hydrogeol. J.* 18: 1253-1264.
  - 11- Chunn D., Faramarzi M., Smerdon B.D., and Alessi D.S. 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(110).
  - 12- Demetriou C., and Punthakey J.F. 1998. Evaluating sustainable groundwater management options using the MIKE SHE integrated hydrogeological modelling package. *Environ. Model. Softw* 14 (2-3): 129-140.
  - 13- Fleckenstein J.H., Krause S., Hannah D.M., and Boano F. 2010. Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. *Advances in Water Resources* 33: 1291-1295.
  - 14- Galbiati L., Bouraoui F., Elorza F.J., and Bidoglio G. 2006. Modeling diffuse pollution loading into a Mediterranean lagoon: development and application of an integrated surface-subsurface model tool. *Ecological Modeling* 193(1–2): 4–18.
  - 15- Gannett M.W., Wagner B.J., and Lite Jr K.E. 2012. Groundwater simulation and management models for the Upper Klamath Basin, Oregon and California. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012-5062.
  - 16- Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., and Arnold J.G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Trans. ASABE.* 50(4): 1211-1250.
  - 17- Gilfedder M., Rassam D.W., Stenson M.P., Jolly I.D., Walker G.R., and Littleboy M. 2012. Incorporating land-use changes and surface-groundwater interactions in a simple catchment water yield model. *Environ. Model. Softw.* 38: 62-73.
  - 18- Graham D.N., and Butts M.B. 2005. Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE. In: V.P., S., D.K., F (Eds.), *Watershed Models*. CRC Press, pp. 245-272.
  - 19- Guzman J.A., Moriasi D.N., Gowda P.H., Steiner J.L., Starks P.J., Arnold J.G., and Srinivasan R. 2015. A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. *Environmental Modelling and Software* 73: 103-116.
  - 20- Harbaugh A.W. 2005. MODFLOW-2005. The U.S. Geological Survey modular groundwater model-the groundwater flow process. *USGS Techniques and Methods*: 6-A16.
  - 21- Huntington J.L., and Niswonger R.G. 2012. Role of surface-water and groundwater interactions on projected summertime streamflow in snow dominated regions: an integrated modeling approach. *Water Resour. Res.* 48(11): W11524.
  - 22- Izady A., Davary K., Alizadeh A., Ziaei A., Alipoor A., Joodavi A., and Brusseau M. 2014. A framework toward developing a groundwater conceptual model. *Arabian Journal of Geosciences* 7(9): 3611–3631.
  - 23- Izady A., Davary K., Alizadeh A., Ziaei A., Akhavan S., Alipoor A., Joodavi A., and Brusseau M. 2015. Groundwater conceptualization and modeling using distributed SWAT-based recharge for the semi-arid agricultural Neishaboor plain, Iran. *Hydrogeol J.* 23(1): 47–68.
  - 24- Kim N.W., I.M. Chung., Y.S. Won., and Arnold J.G. 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *J. Hydrol.* 356: 1–16.
  - 25- Luo Y., and Sophocleous M. 2011. Two-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. *J. of Arid Land.* 3(3): 164-173.
  - 26- Markstrom S.L., Niswonger R.G., Regan R.S., Prudi, D.E., and Barlow P.M. 2008. GSFLOW-Coupled Groundwater and Surface-water FLOW Model Based on the Integration of the Precipitation-runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-water Flow Model (MODFLOW-2005). U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-D1, 240pp.
  - 27- Markstrom S.L. 2012. Integrated Watershed-scale Response to Climate Change for Selected Basins across the United States. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5077, 143pp.

- 28- Mashburn S.L., Ryter D.W., Neel C.R., Smith S.J., and Magers J.S. 2013. Hydrogeology and Simulation of Groundwater Flow in the Central Oklahoma (Garber-Wellington) Aquifer, Oklahoma, 10987 to 2009, and Simulation of Available Water in Storage, 2010-2059. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5219.
- 29- McDonald M.G., and Harbaugh A.W. 1988. A modular three dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of Water Resources Investigations, Book 6. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey.
- 30- Menking K.M., Syed K.H., Anderson R.Y., Shafike N.G., and Arnold J.G. 2003. Model estimates of runoff in the closed, semiarid Estancia basin, central New Mexico, USA. Hydrological Sciences Journal, 48(6): 953-970.
- 31- Ministry of Power. 2011, Final report of extended ban: Khorasan-e-Razavi Regional Water Company, Office of Basic Studies of Water Resources. (In Persian)
- 32- Molina-Navarro E., Bailey R.T., Andersen H.E., Thodsen H., Nielsen A., Seonggyu P., Jensen J.S., Jensen J.B., and Trolle D. 2019. Comparison of abstraction scenarios simulated by SWAT and SWAT-MODFLOW. Hydrological Sciences Journal.
- 33- Nazarieh F., Ansari H., Ziaei A.N., Davari K., and Izady A.A. 2017. Estimation of the Recharge spatiotemporal pattern by Distribute PRMS model (Case study: Neishaboor watershed). Journal of Iran-Water Resources Research 20(14-1): 226-238. (In Persian with English abstract)
- 34- Niswonger R.G., Prudic D.E., and Regan R.S. 2006. Documentation of the unsaturated-zone flow (UZFI) package for modeling unsaturated flow between the land surface and the water table with MODFLOW-2005, USGS Techniques and Methods 6-A19.
- 35- Niswonger R.G., Prudic D.E., Fogg G.E., Stonestrom D.A., and Buckland E.M. 2008. Method for estimating spatially variable seepage loss and hydraulic conductivity in intermittent and ephemeral streams. Water Resour. Res. 44 (5), W05418.
- 36- Niswonger R.G., Panday S., and Ibaraki M. 2011. MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005: USGS Survey Techniques and Methods 6-A37.
- 37- Panday S., and Huyakorn P.S. 2004. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. Adv. Water Resour 27(4): 361-382.
- 38- Paschke S.S. 2011. Groundwater Availability of the Denver Basin Aquifer System, Colorado. U.S. Geological Survey Professional Paper 1770.
- 39- Perez A.J., Abrahao R., Causape J., Cirpka O.A., and Bürger C.M. 2011. Simulating the transition of a semi-arid rainfed catchment towards irrigation agriculture. J. Hydrol. 409 (3-4): 663-681.
- 40- Peterson J.R., and Hamlet J.M. 1998. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. JAWRA. 34(3): 531-544.
- 41- Rassam D.W., Peeters L., Pickett T., Jolly I., and Holz L. 2013. Accounting for surface-groundwater interactions and their uncertainty in river and groundwater models: a case study in the Namoi River, Australia. Environ. Model. Softw. 50(0): 108-119.
- 42- Rumman M.A., and Payne D.F. 2003. Model Framework and Preliminary Results of the Regional MODFLOW Ground-Water Flow Model of Costal Georgia, South Carolina, and Florida. 2003. Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference held April 23-24, 2003, at the University of Georgia.
- 43- Santhi C., Arnold J.G., Williams J.R., Dugas W.A., Srinivasan R., and Hauck L.M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. J. American Water Resources Assoc. 37(5): 1169-1188.
- 44- Siebert S., Burke J., Faures J.M., Frenken K., Hoogeveen J., Doll P., and Portmann F.T. 2010. Groundwater use for irrigation - a global inventory. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 7(3): 3977-4021.
- 45- Sophocleous M.A., Koelliker J.K., Govindaraju R.S., Birdie T., Ramireddygar S.R., and Perkins S.P. 1999. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: the case of the Rattlesnake Creek basin in southcentral Kansas. J. Hydrol. 214(1-4): 179-196.
- 46- Sophocleous M., and Perkins S.P. 2000. Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. J. Hydrol. 236(3-4): 185-201.
- 47- Sophocleous M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. Hydrogeol. J. 10(1): 52-67.
- 48- Spruill C.A., Workman S.R., and Taraba J.L. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. Trans. ASAE 43(6): 1431-1439.
- 49- Srivastava P., McNair J.N., and Johnson T.E. 2006. Comparison of process-based and artificial neural network approaches for streamflow modeling in an agricultural watershed. JAWRA 42(2): 545-563.
- 50- Therrien R., McLaren R.G., Sudicky E.A., and Panday S.M. 2010. HydroGeoSphere A Three-dimensional Numerical Model Describing Fully-integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport. Technical report.
- 51- Tian Y, Zheng Y, Wu B, Wu X, Liu J, and Zheng C. 2015. Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture. Environmental Modeling and Software 63: 170-184.
- 52- VanderKwaak J.E., and Loague K. 2001. Hydrologic-Response simulations for the R-5 catchment with a

- comprehensive physics-based model. *Water Resour. Res.* 37(4): 999-1013.
- 53- Van Genuchten M., Leij F., and Yates S. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Technical Report EPA/600/2-91/065, US Environmental Protection Agency.
- 54- Velayati S., and Tavasoli S. 1991. *Khorasan Water Resources and Issues*. Astan Quds Razavi Printing and Publishing Company, Mashhad. (In Persian)
- 55- Wei X., Bailey R.T., Records R.M., Wible T.C., and Arabi M. 2018. Comprehensive Simulation of Nitrate Transport in Coupled Surface-Subsurface Hydrologic Systems using the linked SWAT-MODFLOW-RT3D model, *Environmental Modelling and Software*.
- 56- Werner A.D., Gallagher M.R., and Weeks S.W. 2006. Regionale-scale, fully coupled modelling of stream-aquifer interaction in a tropical catchment. *J. Hydrol.* 328(3-4): 497-510.

## Integrated Surface and Groundwater Flow Modeling in Neishaboor Watershed with SWAT-MODFLOW

A. Saadatpour<sup>1</sup> - A. Alizadeh<sup>2\*</sup> - A.N. Ziaei<sup>3</sup> - A. Izady<sup>4</sup>

Received: 27-08-2018

Accepted: 26-05-2019

**Introduction:** During the last decades, arid and semi-arid regions has faced a severe problem of depletion of groundwater resources due to the over-exploitation of the aquifer. Moreover, groundwater and surface water are not isolated components of the hydrologic system, but instead interact in a variety of aspects in which development of one commonly affects the other. Additionally, the interaction is often complicated by agricultural activities including surface water diversion, groundwater pumping and irrigation. This study presents an integrated SWAT-MODFLOW model that couples land surface hydrology and groundwater hydrology to determine spatial groundwater percolation patterns considering allowable groundwater pumping rates for the Neishaboor watershed, Iran. Within the integrated model, the pumped groundwater is applied as irrigation to the cultivated fields within the SWAT model, with deep percolation from the soil profile bottom applied to the MODFLOW model as recharge. The model is tested against observed stream flow and water table elevation, with model output then used to assess and quantify spatial-temporal patterns of groundwater recharge to the aquifer.

**Materials and Methods:** The recently developed SWAT-MODFLOW modeling code simulates spatially-distributed hydrologic processes in the coupled land surface / aquifer system, with SWAT simulating land surface, soil zone, and stream flow routing processes and MODFLOW simulating groundwater flow and groundwater/surface water interaction processes. Modifications which is done to the modeling code includes: 1) Linking pumping from MODFLOW cells to SWAT HRUs for groundwater irrigation and 2) Imposing shallow water table percolation and lateral flow conditions for SWAT HRUs when the MODFLOW-simulated water table is within the soil profile of the HRU. The integrated SWAT-MODFLOW framework is tested in the Neishaboor watershed (9157 km<sup>2</sup>) for the 1998 to 2011 time period. Climate of the region is classified as semi-arid, with an average annual precipitation of 265 mm that varies considerably from one year to another. The mean annual temperatures changes from 13°C in the mountainous area to 13.8°C in the plain area and the annual potential evapotranspiration is about 2,335 mm. The main crops that are grown in the watershed is irrigated and rain fed wheat during fall and winter and corn silage during summer. Regarding previous studies, about 93.5% of the groundwater withdrawals in the Neishaboor watershed are consumed in agriculture, mostly for irrigation. Therefore, irrigation practices play a crucial role in the water resources balance in the study area. Within the integrated model, the pumped groundwater is applied as irrigation to the cultivated fields within the SWAT model, with deep percolation from the soil profile bottom applied to the MODFLOW model as recharge. The SWAT model was calibrated and tested in SWAT-CUP for the 2001-2009 and 2010-2011 periods, against stream flow and developed model was calibrated manually against groundwater level data.

**Results and Discussion:** Annual average recharge, calculated from the daily recharge values pass from SWAT to MODFLOW, demonstrating higher recharge rates in the alluvial fans and upland plain. Observed and simulated stream discharge in four hydrometric stations demonstrate good similarity results with the observed hydrograph. The NS values for monthly discharge rates are considered acceptable, however, the field-estimated stream flow estimates contain a high degree of uncertainty. Simulated cell-wise groundwater hydraulic head at the end of the simulation is compared with observation values with the highest water table elevation occurring in the north east and low water table elevation occurring in the outlet. Comparing observed and simulated average groundwater levels at the 48 monitoring wells, the deviation from the 45-degree line is less than 2.5 m for over 73% of the circles. The manual calibrated model can capture the main temporal trend. Overall, the model well captures the long-term characteristics of the regional groundwater level.

**Conclusion:** In this study, a new coupled model, referred to as SWAT-MODFLOW was used to model a dry and semi-arid region with a complicated irrigation system with groundwater pumping. A comprehensive model,

1, 2 and 3- Graduated Ph.D., Professor and Associate Professor Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: alizadeh@um.ac.ir)

4- Water Research Center, Sultan Qaboos University, Muscat, Oman

will enable accurate simulations of stream flow and water table fluctuations in watersheds and aquifers respectably. In short, surface water infiltration is passed from SWAT to MODFLOW based on the contributing areas of the HRUs to the groundwater grid. Pumping agriculture water is then calculated and passed back to SWAT. The need for such a model is highlighted by the Neishaboor basin, where the agriculture is completely based on groundwater pumping. The case study in the Neishaboor basin demonstrated the applicability of the model for large, dry basins. The model will be used to determine best management practices for groundwater pumping in the region.

**Keywords:** Groundwater, Integrated Model, Neishaboor, Surface Water, SWAT-MODFLOW