مقاله مروری

بررسی سیر مدل‌سازی تلفیقی آب سطحی- آب زیرزمینی با استفاده از مدل یکپارچه SWAT - MODFLOW

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۶)

چکیده

مدل‌های هیدرولوژیکی ابزاری سودمند در برنامه‌ریزی منابع آب به شمار می‌روند، اما عملکرد برخی از آنها در مقیاس منطقه‌ای رضایت‌بخش نبوده، چراکه این مدل‌ها مختص مقیاس مکانی خاصی بوده و از طرفی کمبود داده‌های ورودی نیز به‌عنوان یک عامل محدودکننده در مدل‌سازی عمل می‌کند. یکی از راه‌های غلبه بر این محدودیت، استفاده از یک مدل جامع انعطاف‌پذیر در حوضه‌های آبریز مختلف است. از آن‌جا که منابع آب سطحی و زیرزمینی در اکوسیستم‌های زیست‌محیطی دارای برهم‌کنشی پویا بوده و یک سامانه منابع آب ترکیبی را تشکیل می‌دهند، بنابراین، در این مطالعه کاربرد دو روش کلی به نام مدل‌های یکپارچه و نواحی جفت‌شده، جهت تلفیق مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی این روش‌ها نشان داد که تمرکز اصلی در اکثر مطالعات روی دو پارامتر تغذیه و تبخیر و تعرق و تلاش در راستای افزایش دقت مقادیر این دو مؤلفه در شبیه‌سازی است. نتایج حاصل 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 داده و جریان آب سطحی، زیرزمینی و ارتباط آبخوان- رودخانه را شبیه سازی نماید. این روش می‌تواند اطلاعات مفیدی را در مورد بیلان آبی حوضه فراهم کرده و به برنامه‌ریزی دقیق‌تر منابع آب کمک نماید.

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

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

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

مقدمه

ایران از نظر برداشت آب‌های زیرزمینی در خاورمیانه رتبه نخست را داشته و ۳۴ درصد کل برداشت آب در منطقه را به تنهایی انجام می‌دهد. با توجه به این‌که اصلی‌ترین منبع تأمین آب شرب و کشاورزی در ایران آب‌های زیرزمینی هستند، تقریباً ۶۰ درصد آب‌های شیرین ایران را تشکیل می‌دهند (۳). در سالیان اخیر، خشکسالی‌های پی‌درپی و برداشت بی‌رویه منجر به کاهش محسوس این منابع شده است. از طرف دیگر برداشت آب‌های زیرزمینی و استفاده از آن در مصارف گوناگون، ارتباط بین آب سطحی و زیرزمینی را بسیار پیچیده کرده است. بنابراین، استمرار یا توسعه بهره‌برداری از این منابع مستلزم شناخت ویژگی‌های کمّی و کیفی آبخوان و مدیریت یکپارچه آن است. در چند دهه اخیر برآورد درست از وضعیت کمّی و کیفی رواناب یکی از دغدغه‌های مدیریت کلان کشور به حساب می‌آید که عدم وجود اطلاعات هیدروکلیماتولوژی در برخی از حوضه‌ها بر این دغدغه افزوده است. روش‌های مختلفی برای محاسبه رواناب ناشی از برف و باران وجود دارد، یکی از این روش‌ها که امروزه کاربرد فراوانی یافته، مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز است. یکی دیگر از اجزای مهم چرخه هیدرولوژی را آب زیرزمینی تشکیل می‌دهد که شناخت رفتار آن نیازمند حفر تعداد زیادی چاه گمانه، انجام آزمایش‌های پمپاژ، ژئوفیزیک و تحقیقات طولانی‌مدت است که با صرف هزینه‌های فراوان عملی می‌شود. یک روش غیرمستقیم بررسی این سامانه، استفاده از مدل‌های عددی آب زیرزمینی به‌عنوان روشی ارزان و سریع در مطالعه چگونگی حرکت، بررسی بیلان و مدیریت بهره برداری از آبخوآنها است (۱۷). یکی از مهم‌ترین عوامل در تهیه مدل مفهومی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مقدار تغذیه آب زیرزمینی بوده که به کمیت درآوردن آن بسیار مشکل است. تغذیه به‌طور معمول به چهار طریق صورت می‌گیرد؛ از طریق درز و شکاف‌ها در نواحی کوهستانی، از طریق مخروط‌افکنه‌های واقع دردامنه کوه‌ها، از بستر مسیل‌ها و رودخانه‌ها و نفوذ مستقیم در دشت. از رایج‌ترین روش‌های تخمین تغذیه از سطح دشت که ناشی از بارندگی و آب برگشتی آبیاری است، می‌توان به روش‌های مبتنی بر بیلان آب زیرزمینی، منطقه‌بندی بر اساس قابلیت انتقال و مدل‌سازی بارش- رواناب اشاره کرد (جدول ۱).

با توجه به موارد ذکر شده می‌توان گفت از آن‌جا که در اکوسیستم‌های زیست محیطی، سامانه آب سطحی و زیرزمینی از هم جدا نبوده و این دو در مقیاس‌های مختلف محلی و منطقه‌ای دارای برهم‌کنش هستند، پس یکی از روش‌های مفید در برنامه‌ریزی منابع آب، مدل‌سازی تلفیقی است که به‌طور هم‌زمان به استفاده بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی توجه دارد. امروزه در سطح جهان مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز وجود دارد که می‌توان به مدل‌های Gsflow، Parflow، MIKE-SHE و Hydrogeosphere اشاره کرد. این مدل‌ها آب سطحی و زیرسطحی را به‌صورت توأمان مدل‌سازی می‌نمایند. از جمله خصوصیات این مدل‌ها می‌توان به پیچیدگی زیاد آنها، نیاز به تخصص زیاد، داده‌های ورودی زیاد، زمان اجرای شبیه‌سازی طولانی‌تر و واسنجی زمان‌بر را اشاره کرد. مدل‌سازی آب سطحی و آب زیرزمینی به‌صورت مجزا نیز در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است. از این میان می‌توان به مدل‌های SWAT و MODFLOW برای آب سطحی و زیرزمینی به‌ترتیب اشاره کرد. آسانی دسترسی و بازبودن کد این مدل‌ها امکان دخل و تصرف را در آنها فراهم کرده و همچنین پشتیبانی تولیدکنندگان این مدل‌ها باعث کاربرد فراوان آنها شده است. این مسئله در اتصال مدل آب سطحی به مدل آب زیرزمینی اهمیت بسیار زیادی داشته و امکان تغییر در متغیرها و مؤلفه‌های مدل از این طریق فراهم است (۱۹). به دلیل محدودیت‌های هر یک از دو مدل SWAT و MODFLOW، تلفیق این دو مدل در طی سال های اخیر کاربردهای موفقیت‌آمیز گسترده‌ای داشته است. در واقع کد SWAT به دلیل اینکه آب زیرزمینی را به‌صورت غیر توزیعی در محاسبات جریان آب زیرزمینی در نظر می‌گیرد،

جدول ۱. روش‌های برآورد تغذیه در دشت

نوع روش	توضیحات
نوسانات سطح ایستابی(WTF) Water Table Fluctuation (۲۳)	– نیازمند شناخت آبدهی ویژه و تغییرات سطح ایستابی در زمان است. – مبتنی بر بالاآمدن سطح آب در آبخوان آزاد در نتیجه تغذیه آب نفوذی به سطح ایستابی است. – نتایج قابل اعتمادی در مناطق با شیب هیدرولیکی کم دارد (۲۳).
بیلان جرمی کلر (CMB) Chloride Mass Balance (۷)	– روشی ساده و ارزان در برآورد تغذیه در نواحی خشک و نیمه‌خشک در مقیاس زمانی و مکانی مختلف – مبتنی بر میزان کلر در بارش و رسوب خشک اتمسفر که از طریق جریان پایین رونده آب به سطح آب زیرزمینی انتقال داده می‌شود. – تخمین تغذیه از اندازه‌گیری مستقیم غلظت کلر در رابطه با آب تغذیه شده به‌دست می‌آید (۷).
بیلان آب(SWB) Soil Water Balance (۷)	– در مناطق اشباع و غیر اشباع کابرد دارد. – تغذیه از اطلاعات در دسترس (بارش، رواناب) به سهولت برآورد می‌شود. – بیلان جرمی آب در یک دوره زمانی که به‌صورت اختلاف بین کل ورودی‌ها و خروجی‌ها بیان می‌شود، برابر تغییرات در حجم ذخیره بیلان است (۷).

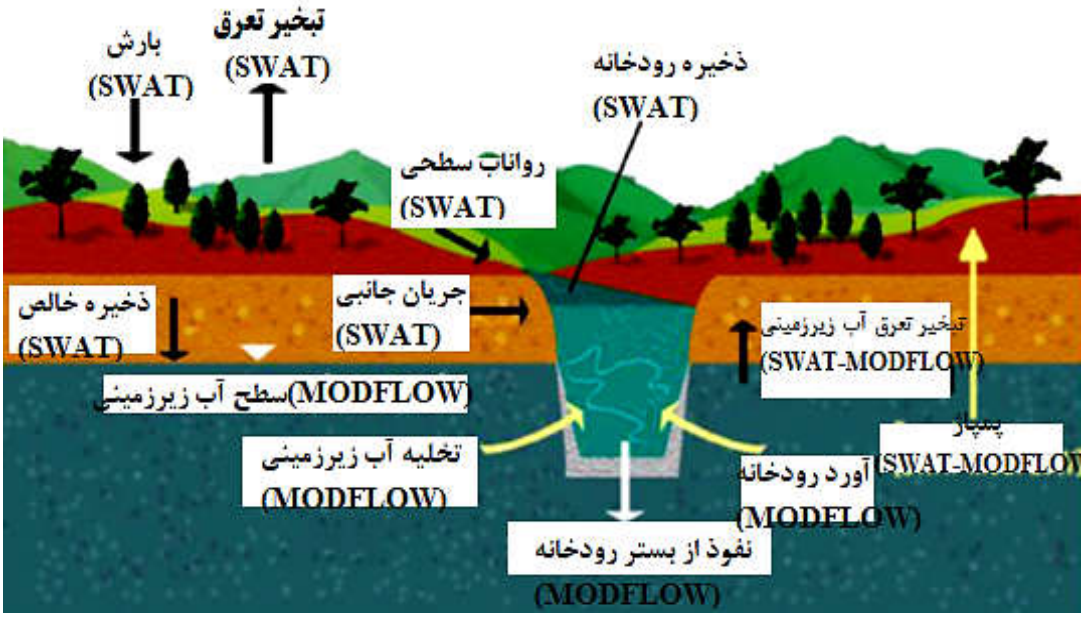
دارای محدودیت است. از طرف دیگر مدل MODFLOW نیز برای محاسبه تغذیه توزیعی آب زیرزمینی که مؤلفه اصلی مدل‌سازی آب زیرزمینی است با مشکل مواجه است. بنابراین، با در نظرگرفتن مزایای هر دو مدل، به کمیت درآوردن کامل مؤلفه‌های هیدرولوژیکی امکان‌پذیر است. شکل ۱ پارامترهای شبیه‌سازی شده توسط هر یک از مدل‌های سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهد. در این مطالعه، هدف تحلیل و بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی یکپارچه با استفاده از مدل SWAT-MODFLOW با کاربرد دو روش کلی به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب سطحی، زیرزمینی و برهم‌کنش بین این دو سامانه و همچنین بررسی قابلیت‌های هر یک از کدهای توسعه‌یافته برای کاربرد در مطالعات منطقه‌ای است.

روش انجام کار

در این بخش ابتدا به معرفی هر یک از مدل‌های SWAT و MODFLOW پرداخته و در ادامه روش‌های تلفیق این دو مدل تشریح و درنهایت مطالعات انجام شده با مدل تلفیقی ارائه شده است.

معرفی مدل SWAT

مدل SWAT (Soil and Water Assessment Tool) مدلی در مقیاس حوضه آبریز، که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ در درازمدت طراحی شده است. مدلی نیمه‌توزیعی و با گام زمانی روزانه که ماژولی برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی دارد که براساس مدل‌های نیمه‌توزیعی پایه‌گذاری شده است و قابلیت تعیین پارامترهای توزیعی همچون ضریب هدایت هیدرولیکی را ندارد (۱۱). از جمله مزایای این مدل می‌توان به شبیه‌سازی حوضه‌های فاقد داده‌های برداشت شده، کمّی کردن تأثیر نسبی اطلاعات ورودی (تغییر در روش‌های مدیریتی، آب و هوا، پوشش گیاهی و غیره) بر کیفیت آب و دیگر متغیرهای مورد نظر، کارآمدبودن از نظر محاسباتی و امکان مطالعه بلندمدت راهبردهای مختلف مدیریتی در حوضه اشاره کرد (۲۰).



شکل ۱. دیاگرام شماتیک از مدل ترکیبی آب سطحی- آب زیرزمینی (۱۳) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT بر اساس معادله بیلان آب استوار است:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^{t}(R^{\circ}_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (۱)$$

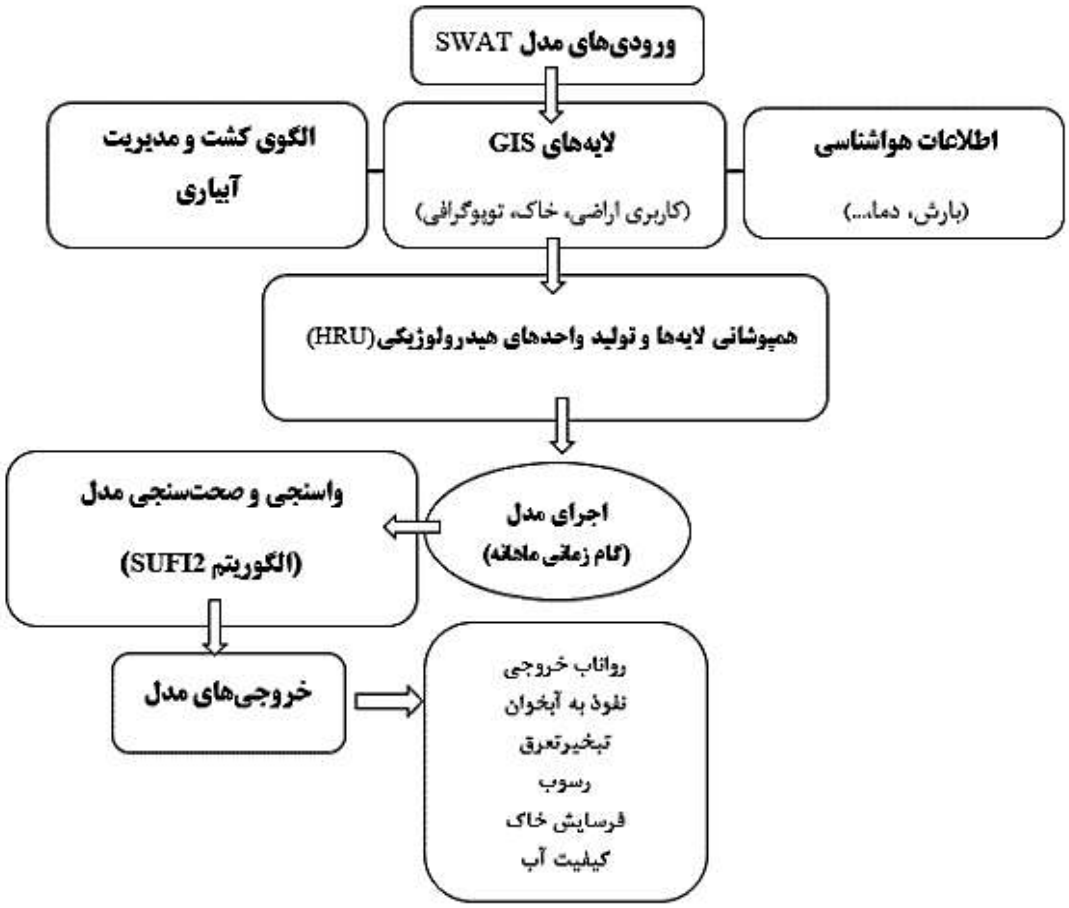
که در این رابطه، SW_t، مقدار نهایی آب در خاک در روز i ام (میلی‌متر)، SW_o، مقدار اولیه آب در خاک در روز i ام (میلی‌متر)، R°_{day} مقدار بارندگی در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf}، مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a، مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep}، مقدار آبی که به پروفیل خاک (منطقه غیر اشباع خاک) در روز i ام وارد می‌شود(میلی‌متر)، Q_{gw}، مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر) است. در شکل ۲ مراحل مدل‌سازی با مدل SWAT ارائه شده است.

معرفی مدل MODFLOW

مدل MODFLOW یک مدل سه‌بعدی تفاضل محدود جریان آب زیرزمینی است که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا در سال ۱۹۸۴ ارائه گردید (۱۷). این مدل قادر به شبیه‌سازی شرایط متفاوتی از آبخوان است. 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. این مدل معادلات حاکم را به‌صورت تفاضلات محدود حل کرده و از معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی (ترکیب شکل سه بعدی معادله دارسی و پیوستگی) برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کند:

$$\frac{\partial}{\partial x}(-k_{xx^{\circ}}\frac{\partial h^{\circ}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(-k_{yy^{\circ}}\frac{\partial h^{\circ}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(-k_{zz^{\circ}}\frac{\partial h^{\circ}}{\partial z}) = S_s.\frac{\partial h}{\partial t} \pm W \quad (۲)$$

که در آن Ss ضریب ذخیره ویژه (1/L)، h بار آبی (L)، t زمان (T)، Kxx، Kyy و Kzz به‌ترتیب مقدار هدایت هیدرولیکی در جهات x، y و z هستند (L/T)، W دبی حجمی در واحد حجم جریان (1/T) که برای تخلیه، منفی و برای تغذیه مثبت است.



شکل۲. دیاگرام شبیه‌سازی با مدل SWAT (۱۹)

مدل SWAT-MODFLOW

مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW ترکیبی از مدل‌های SWAT 2012 و MODFLOW-NWT است (۴). در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه به کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت مکمل انجام گرفته که بررسی این مطالعات نشان می‌دهد دو رویکرد کلی برای طراحی مدل‌های یکپارچه جهت مدیریت منابع آب وجود دارد. در ادامه هر یکاز این رویکردها معرفی و مطالعات انجام‌شده در این زمینه نیز ارائه شده است.

۱) روش مدل‌های کاملاً یکپارچه (Fully Integrated)

این روش به یکپارچه‌سازی به‌طور کامل اشاره دارد که اولین قدم آن ایجاد ارتباط مناسب بین مؤلفه‌ها و نیز معادلات آب زیرزمینی و آب سطحی است. سپس این معادلات برای این دو سامانه با کمک شرایط مرزی به‌طور همزمان در یک گام زمانی حل می‌گردند. این روش، معادله سه‌بعدی ریچاردز را برای شبیه‌سازی جریان اشباع و غیر اشباع استفاده می‌کند. بررسی تحقیقات انجام شده حاکی از این است که اولین گام برای یکپارچه‌سازی مدل‌ها، به کمّیت درآوردن اثر آبیاری و تغییرات اصلی کاربری اراضی روی منابع سطحی و زیرزمینی بوده که نیاز به یک مدل پیوسته در زمان و در مقیاس حوضه است. با توجه به اهمیت زیاد برهمکنش جریان اشباع- غیر اشباع، مدل SWAT که مدلی پیوسته و در مقیاس حوضه و در گام زمانی روزانه اجرا می‌شود و مدل MODFLOW که برهم‌کنش بین دو

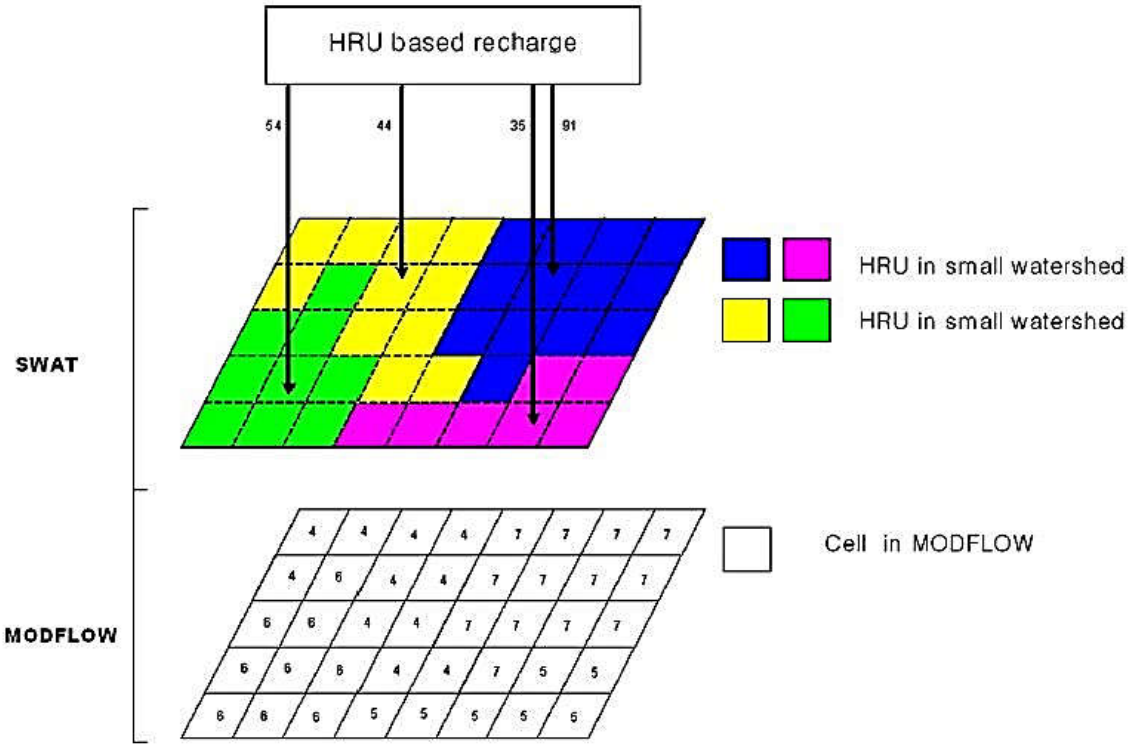
سامانه را کنترل می‌کند، انتخاب شده‌اند. مدلSWAT توانایی شبیه‌سازی کاشت گیاه و مدیریت آبیاری را نیز دارد. به‌طور مشخص مدل SWAT برای MODFLOW یک مدل برای تغذیه آب زیرزمینی، جریان‌های جانبی ورودی به شبکه رودخانه، نیازهای آبیاری و تبخیر از آب زیرزمینی کم‌عمق را فراهم می‌کند که همه آنها باید به‌عنوان شرایط مرزی در مدل MODFLOW مشخص شوند.

۲) روش نواحی جفت‌شده (Coupled Region)

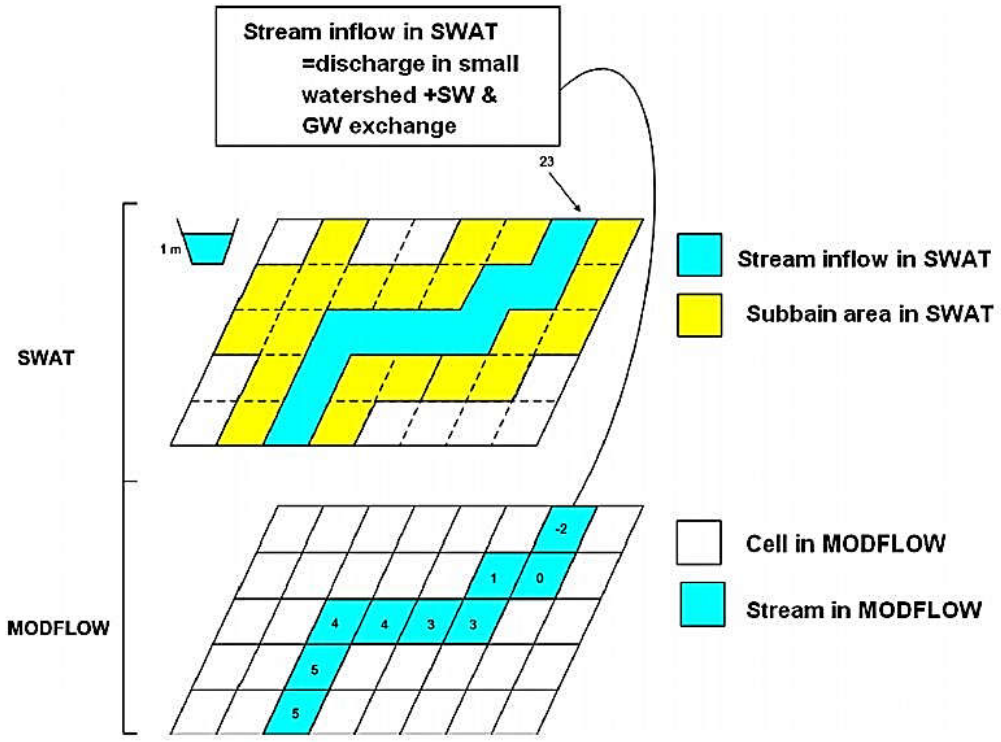
در این روش سامانه‌های سطحی و زیرسطحی به نواحی جداگانه تقسیم و حل معادلات جریان آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت مجزا صورت گرفته، اما تکرارها در یک گام زمانی انجام شده و محاسبات، زمانی‌که خطاهای تکرار به محدوده خاصی رسیده و جواب بهینه حاصل شود وارد مرحله بعد خواهد شد و با این روش تلفیق صورت می‌گیرد. در واقع اجرای مدل تلفیقی نیاز به متغیرهایی دارد که از مدل SWAT به مدل MODFLOW (شامل نفوذ عمقی، تبخیر و تعرق پتانسیل) و یا به‌طور عکس ازMODFLOW به SWAT (تخلیه آب زیرزمینی، تراز سطح ایستابی) انتقال داده شوند. سپس جمع‌آوری و تنظیم تمام داده‌ها برای مدل ترکیبی که شامل اطلاعات آب و هوایی، توپوگرافی، خاک، آبخوان، کاربری اراضی و مدیریت، تغذیه رودخانه است، باید انجام شود. در این روش، گام اول اجرا و واسنجی مدل SWAT بر اساس مدل‌های مفهومی آب سطحی تهیه شده و دستیابی به تغذیه برای هر واحد هیدرولوژیکی است. برای این که مدل ترکیبی قادر به برآورد تغییرات زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی در حوضه باشد، بایستی میزان تغذیه (نفوذ عمقی) محاسبه شده از SWAT به MODFLOW وارد شود (شکل ۳). این مدل بر اساس مدل مفهومی آب زیرزمینی تهیه شده، اجرا و واسنجی گشته، خروجی‌های سلول شامل تغذیه، تبخیر و تعرق آبخوان، عمق سطح ایستابی و حجم تخلیه آب زیرزمینی در حوضه و مقدار تبادل بین رودخانه و آبخوان به‌منظور محاسبات بیلان آبی و روندیابی جریان آب در سرتاسر شبکه رودخانه درحوضه از طریق واحدهای هیدرولوژیکی به نام HRU به SWAT فرستاده می‌شوند. برای محاسبه برهم‌کنش آب سطحی و زیرزمینی، ماژول روندیابی جریان رودخانه در SWAT با بسته جریان رودخانه در MODFLOW که قانون دارسی را برای محاسبه جریان حجمی آب درمقطع عرضی منطقه جریان بین آبخوان و رودخانه به کار می‌برد، تلفیق می‌شوند. این تبادل آب، یا به رودخانه به‌عنوان جریان پایه اضافه می‌شود یا درصورتی‌که رودخانه آب زیرزمینی را تغذیه نماید از آن کسر می‌شود. این محاسبات برای هر سلول شبکه در طول مسیری که رودخانه جریان دارد، انجام می‌شود. پس از فراخوانی داده‌ها برای دو مدل، شبیه‌سازی در طی فرایند تکرار روزانه محاسبات HRU در SWAT، انتقال داده‌ها به MODFLOW و اجرای آن، انتقال داده‌ها به SWAT و روندیابی آب در سرتاسر شبکه رودخانه حوضه اجرا می‌شود (شکل ۴). این کار تا زمانی که اهداف واسنجی هر دو مدل تحقق یافته و توزیع زمانی و مکانی تغذیه و سایر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی به‌طور مناسبی تعیین شود ادامه می‌یابد. درواقع با کاربرد رابط تبدیل CELL-HRU، مدل قادر به شبیه‌سازی توزیعی مکانی- زمانی میزان تغذیه آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق آبخوان و تراز آب زیرزمینی و نیز تحلیل برهم‌کنش بین شبکه رودخانه و آبخوان می‌شود.

بررسی مطالعات انجام شده

به‌تازگی در مطالعات مختلف، مدل SWAT با مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW تلفیق شده است. اگرچه در ابتدا هیچ رابط گرافیکی برای آماده‌سازی شبیه‌سازی‌های SWAT-MODFLOW ایجاد نشده بود، و درنتیجه به دلیل پیچیدگی‌های مدل و پیوند مکانی لازم بین واحدهای محاسباتی (HRU) در مدل SWAT، و سلول‌های شبکه تفاضل محدود در مدل MODFLOW، کاربرد مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW در ابتدا به توسعه‌دهندگان نسخه‌های



شکل۳. دیاگرام شماتیک از محاسبه تغذیه در مدل SWAT-MODFLOW (۱۳) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل۴. دیاگرام شماتیک از برهمکنش آبخوان= رودخانه در مدل SWAT-MODFLOW (۱۳) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

مدل مربوطه محدود شده بود. در ادامه به برخی از مطالعات انجام شده با مدل تلفیقی اشاره شده است.

سافوکلیوس و همکاران (۲۴) به‌عنوان پیشگامان این موضوع، رابطی به نام SWATMOD برای حوضه‌ای در کانزاس مرکزی به وسعت ۳۶۲۵ کیلومتر مربع توسعه دادند که قابلیت شبیه‌سازی جریان آب سطحی، زیرزمینی و اندرکنش آبخوان- رودخانه را به‌طور پیوسته دارا بود. نتایج مدل تلفیقی کارایی بالای مدل را نشان داد، به‌طوری‌که کاربرد آن در برنامه‌ریزی منابع آب را توصیه کردند. کیم و همکاران (۱۳)، رابط Cell-HRU در مدل SWAT-MODFLOW را برای حوضه‌ای به مساحت ۱۹۸ کیلومترمربع در کره توسعه دادند. شبیه‌سازی توزیع مکانی- زمانی تغذیه آب زیرزمینی، تراز آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق آبخوان و برهمکنش آبخوان و رودخانه را بررسی و مقدار ضریب همبستگی از طریق واسنجی مدل به‌صورت سعی و خطا را حدود ۰/۷ برآورد کردند و نتیجه گرفتند که کاهش جریان رودخانه به دلیل برداشت توسط چاه‌های پمپاژ است و زمانی که بر همکنش آب سطحی و زیرزمینی وجود دارد، استفاده از این مدل در برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار آب‌های زیرزمینی بسیار مفید خواهد بود. بجرانوندا و همکاران (۵) برای شبیه‌سازی برهم‌کنش آب زیرزمینی و سطحی در تایلند از مدل تلفیقی استفاده کرده و نشان دادند نتایج مدل تلفیقی در مرحله واسنجی از مدل‌های جداگانه به مراتب بهتر بوده است. به‌طوری‌که دقت شبیه‌سازی مدل تلفیقی حدود ۲ تا ۲۰ درصد نسبت به مدل‌های جداگانه به خصوص در فصل خشک افزایش داشته است. گازمن و همکاران (۱۱) از مدل یکپارچه SWATMF برای بررسی برهمکنش آب سطحی- زیرزمینی برای حوضه‌ای به مساحت ۷۸۰ کیلومترمربع در اوکلاهاما استفاده کردند. مدل تراز آب زیرزمینی را به‌نسبت خوب شبیه‌سازی کرد و مقدار ضریب تبیین نش- ساتکلیف را برای سه ایستگاه هیدرومتری و چاه‌های مشاهداتی بزرگتر از۰/۵ گزارش کردند. نتایج ایشان نشان داد که با استفاده از این مدل می‌توان شبیه‌سازی در مقیاس حوضه را بهبود بخشید و نوسانات آبخوان را متناسب با تغییرات فصلی و اقلیمی بررسی کرد. بیلی و همکاران (۴) به بررسی الگوهای مکانی- زمانی تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه در منطقه نیمه‌خشک حوضه رودخانه اسپراگو به مساحت ۴۱۰۰ کیلومترمربع با استفاده از مدل SWAT-MODFLOW پرداختند. مقادیر ضریب همبستگی (R^2) و نش- ساتکلیف (NSE) را برای مدل تلفیقی در دوره واسنجی، در مقیاس روزانه ۰/۴و ۰/۳۸ و در مقیاس ماهانه ۰/۷۵ و ۰/۷۲ به‌ترتیب ارائه کردند. همچنین مقادیر این ضرایب در حالت اجرای مدل SWAT به تنهایی، ۰/۳۵ و ۰/۱۶ در مقیاس روزانه و ۰/۶۶ و ۰/۶۶ در مقیاس ماهانه برآورد شد. مدل تلفیقی، متوسط تراز سطح آب را ۳/۹ متر کمتر از متوسط تراز مشاهداتی و مدل MODFLOW متوسط تراز سطح آب را ۹ متر کمتر از متوسط تراز مشاهداتی برآورد کرد. همچنین، بر اساس نتایج حاصل بخش عظیمی، حدود ۷۰ درصد جریان رودخانه از طریق آبخوان تغذیه می‌شود. درنهایت نتایج نشان داد مدل تلفیقی برآوردهای منطقی‌تری از تخمین آب زیرزمینی در حوضه ارائه می‌دهد. لایو و همکاران (۱۵) به مقایسه شبیه‌سازی مدل SWAT با SWAT-MODFLOW در ارزیابی اثرات برداشت از آب زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی برای حوضه رودخانه آگربای در دانمارک به مساحت ۳۵۷ کیلومترمربع پرداختند. نتایج آنها نشان داد که سالانه ۸۰۰ میلیون‌مترمکعب از منابع زیرزمینی برای آبیاری و شرب برداشت شده و مدل تلفیقی در شبیه‌سازی جریان موفق‌تر عمل کرده است. علیاری و همکاران (۲) از نسخه به‌روزشده مدل SWAT-MODFLOW برای حوضه‌های رودخانه بزرگ شهری- کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک استفاده کردند. از مزیت‌های مدل اصلاح‌شده مورد استفاده می‌توان پیوند بین پمپاژ از مدل آب زیرزمینیMODFLOW، در قالب بسته چاه در کُد MODFLOW با واحدهای هیدرولوژیکی در معرض آبیاری در مدل SWAT و همچنین کمّی‌سازی مقادیر آبیاری در دو حالت برداشت منابع آب سطحی و برداشت از منابع

آب زیرزمینی اشاره کرد. سایر مطالعات انجام شده در سطح ایران و جهان به تفکیک نوع روش تلقیق در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان گفت به هدف فراهم‌کردن ابزاری برای شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی روی یک حوضه، مدل کاربردی باید ۱) اساس فیزیکی داشته و به‌منظور پذیرش داده‌های سهل الوصول طراحی شود. ۲) توانایی اجرا در مقیاس حوضه و قابلیت تقسیم به واحدهای کوچکتر را بر اساس توپوگرافی، کاربری اراضی و مدیریت حوضه داشته باشد، ۳) پیوسته در زمان بوده و قابلیت شبیه‌سازی فاکتورهای مدیریت اراضی از قبیل دوره تناوب و برنامه ریزی آبیاری را داشته باشد، ۴) قادر به شبیه‌سازی دوره‌های زمانی طولانی‌مدت بوده و از نظر محاسباتی به‌منظور شبیه‌سازی انواع راهبردهای مدیریتی بدون هزینه‌های اضافی، کارآمد باشد. بررسی پژوهش‌ها حاکی از این است که سامانه شبیه‌سازی شده توسط مدل تلفیقی چهار حجم کنترل را در بر می‌گیرد که شامل؛ سطح، پروفیل خاک یا منطقه ریشه، آبخوان کم‌عمق و آبخوان عمیق است. آبخوان کم‌عمق (عمق ۲ تا ۲۰ متری) آبخوانی است که آب موجود در آن توسط رودخانه زهکشی شده، درحالی‌که آبخوان عمیق (با عمق بیش از ۲۰ متر) آبخوانی است که آب وارد شده به آن درنهایت در مکانی خارج از حوضه به جریان سطحی می‌پیوندد. یکی از ضروری‌ترین مؤلفه‌های یک مدل آب زیرزمینی مناسب، داشتن اطلاعات دقیقی از مقادیر تغذیه در بین اطلاعات ورودی است که بدون برآورد مناسب تغذیه و توزیع مکانی و زمانی آن، این مدل‌ها غیر قابل اعتماد می‌شوند. مقدار تغذیه آب زیرزمینی از نظر زمانی و مکانی با تغییر عواملی نظیر شرایط آب و هوایی، کاربری اراضی، خاک، و پوشش گیاهی تغییر می‌کند (۲۱). قابلیت اعمال این عوامل در مدل‌هایی که جهت شبیه‌سازی آب زیرزمینی به کار می‌روند، وجود ندارد و در اغلب موارد تنها تأثیر بارش را درنظر گرفته و تغذیه را به‌صورت درصدی از بارندگی به مدل وارد می‌کنند و در طی واسنجی مدل، مقادیر آن را تعیین می‌نمایند. از راهکارهای مؤثر در افزایش دقت مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق، شبیه‌سازی جامع فرایندهای هیدرولوژیکی در تقابل با یکدیگر و استفاده از نتایج حاصل در مدل آب زیرزمینی است. در واقع مشکل اصلی در تلفیق مؤثر و حل عددی معادلات آب سطحی و زیرزمینی، تفاوت ذاتی در مقیاس‌های زمانی بین دو سامانه است. بارندگی و جریان رودخانه زمان تداوم کوتاه دارند و در مقابل اندازه‌گیری‌های آب زیرزمینی به‌طور سالانه، سه ماهه یا حداکثر ماهانه انجام می‌شوند. وجود این نابرابری‌های بزرگ در گام‌های زمانی بین آب‌های سطحی و زیرزمینی اغلب منجر به ناپایداری‌های عددی در حل برای میزان نفوذ و نشت جریان رودخانه می‌شود. به‌طور ایده‌آل، حرکت جریان رودخانه و آب زیرزمینی باید با یک گام زمانی به دلیل برهمکنش آنها محاسبه شود که در این صورت از بروز مشکلات ناپایدار عددی ممکن جلوگیری می‌شود. به‌طور معمول در معادلات روابط آب سطحی- زیرزمینی، تبادل میان دو سامانه به میزان هدایت هیدرولیکی، ضریب نفوذ از بستر رودخانه با اختلاف بار هیدرولیکی مربوط به آنها مرتبط می‌شود.

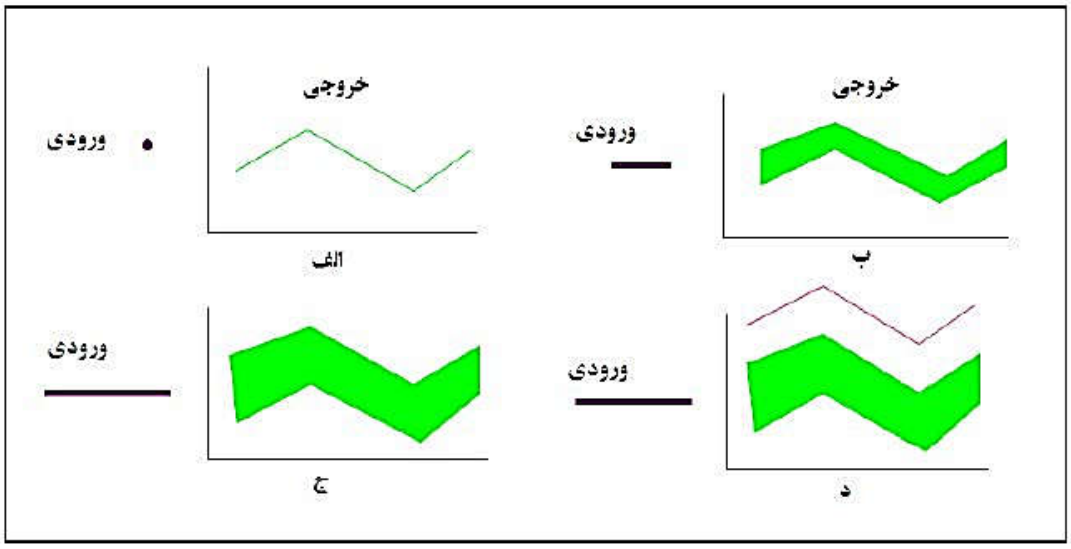
نتایج و بحث

بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی هیدرولوژیکی نشان می‌دهد که عدم قطعیت در مدل‌های جریان آب زیرزمینی به‌طور عمده ناشی از خطاهای موجود در شبیه‌سازی مقادیر مدل است (شکل ۵). پس از تعیین پارامترهای آبخوان در فرایند واسنجی مدل و اطمینان از منحصربه فرد بودن جواب‌ها پس از طی مرحله صحت‌سنجی می‌توان به قابل اعتمادبودن مدل صحه گذارد. تحلیل و بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه کاربرد مدل تلفیقی نشان داد در سال‌های ابتدایی پیدایش مدل، کاربرد آن با محدودیت‌های زیادی مواجه بوده است. از جمله لحاظ نشدن منطقه غیر اشباع زیر ریشه در مدل‌سازی، چشم‌پوشی از

جدول۲. بررسی مطالعات انجام شده با مدل SWAT-MODFLOW

نویسندگان	کشور	حوضه	مساحت حوضه/آبخوان (کیلومترمربع)	اقلیم	نوع آبخوان	دوره شبیه سازی (سال)	تعداد چاه‌های مشاهده‌ای	تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری	روش تلفیق
سافکلیوس و همکاران (۲٤)	ایالات متحده	Rattlesnake Creek	۳٦۲٥	خشک	آزاد، تک لایه	٤۰	٤	۳	F
سافکلیوس و پرکین (۲٥)	ایالات متحده	Repulican	-	نیمه خشک	آزاد، تک لایه	۳٤	-	٦	F
گالبیاتی و همکاران (۹)	ایتالیا	Bonello	۲۰	خشک	دو لایه	٦	٦	۲	C
کیم و همکاران (۱۳)	کره جنوبی	Musimcheon	۱۹۸	خشک	سه لایه	٥	۱	۲	C
ژانگ و همکاران (۲٦)	چین	Xitiaoxi	۱۹۳۰	خشک	آزاد، تک لایه	۱٤	۱	۲	C
چانگ و همکاران (٦)	کره جنوبی	Mihocheon	۱۸٦۸	مرطوب	آزاد، تک لایه	٦	-	-	C
لئو و سافکلویس (۱٦)	چین	Hetao Irrigation District	۱٤۹۱۷	خشک	آزاد، تک لایه	۱۰	-	-	F
بجرانوندا و همکاران(٥)	تایلند	upper Chao Phraya	٤٤۰	خشک	دو لایه	۱۰	۲	۳	F
ایزدی (۱۲)	ایران	نیشابور	۹٤۰۰	نیمه خشک	آزاد،تک لایه	۱۲	٤۸	٥	F
دولت آبادی و همکاران(۸)	ایران	فیروز آباد فارس	۷۲۳	خشک	آزاد،تک لایه	۱٦	۳۲	۱	F
کوچک زاده و همکاران (۱٤)	ایران	سیلاخور لرستان	٥۹۰	نیمه مرطوب	آزاد، تک لایه	۸	۲۰	۲	F
گازمن و همکاران (۱۱)	ایالات متحده	Fortcobb	۷۸۰	نیمه مرطوب	آزاد، تک لایه	۸	٥	۳	C
بیلی و همکاران (٤)	ایالات متحده	SpragueRiver	٤۱۰۰	نیمه خشک	دو لایه	۳٤	٦۹	۱	C
سعادت‌پور و همکاران(۲۲)	ایران	نیشابور	۹٤۰۰	نیمه خشک	آزاد، تک لایه	۱۲	٤۸	٥	C
علیاری و همکاران (۳)	ایالات متحده	SouthPlatte	۷۲۰۰۰	نیمه خشک	آزاد، تک لایه	۱٥	۱٦	۸	C
نائب فاروجی و همکاران(۱۸)	ایران	شازند	۲۷۳/۲	نیمه خشک	آزاد، تک لایه	۱۲	۱۹	۳	C

*F: Fully Integrated, C: Coupled Region



شکل۵. رابطه بین عدم قطعیت در پارامترهای ورودی و خروجی مدل (۱) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جریان‌های برگشتی از آبخوان عمیق و میزان نفوذ از بستر رودخانه، که باعث تغذیه آبخوان کم عمق می‌شود و همچنین تأثیر دریاچه‌ها، مخازن، سدها و یا زهکش‌های طبیعی در بالادست یا پایین‌دست حوضه که صرفنظر از این عوامل باعث کم‌برآوردکردن میزان جریان در حوضه‌ها شده است. درواقع مدل باید این توانایی را داشته باشد که هم اثرات هیدرولوژیکی را بررسی نماید و هم برهمکنش هیدرولیکی بین آب‌های سطحی و زیرزمینی را تحلیل نماید. در برخی تحقیقات جهت سهولت، مرز آبخوان را برای هر دو مدل در نظر گرفته‌اند، درصورتی‌که در مدل SWAT مرز حوضه و در مدل MODFLOW مرز آبخوان به مدل معرفی می‌شود و باید بررسی شود که واحدهای هیدرولوژیک، داخل آبخوان واقع می‌شوند یا خارج از آن، چراکه شرایط اعمال تغذیه آنها متفاوت است. در بعضی مطالعات از تأثیر پارامترهای عملکرد گیاه و تخلیه آب زیرزمینی صرفنظر شده است. درنظرگرفتن این پارامترها به خصوص در مناطق نیمه‌خشک از آن جهت حائز اهمیت است که آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع مهم برای مصارف مختلف محسوب می‌شود. در این مناطق بارندگی در یک دوره کوتاه‌مدت رخ داده و میزان تبخیر و تعرق زیاد است. بنابراین، می‌توان گفت به دلیل ارتباط مستقیم تبخیر و تعرق واقعی با عملکرد گیاه و برداشت از آبخوان، دارای سطح اعتماد بیشتری در رابطه با تفکیک آب موجود در خاک به ذخیره خاک، تبخیر و تعرق واقعی و تغذیه آبخوان می‌باشد. بنابراین، بهتر است تأثیر این عوامل در مدل‌سازی نظر گرفته شود. نتایج نشان داد که اهمیت برهمکنش بین منطقه آب زیرزمینی و منطقه آب خاک به عمق سطح آب زیرزمینی بستگی دارد به‌طوری‌که در این راستا سه سطح با وابستگی متقابل تعیین می‌شود (۱۰). اول اینکه اگر سطح آب زیرزمینی عمیق باشد (در عمق بیش از ۲۰ متر)، ارتباط یک طرفه است، با تغذیه آب زیرزمینی که در طول دوره با مقدار آب زیاد در منطقه آب خاک اتفاق می‌افتد، مقدار آب خاک مستقل از تراز آب زیرزمینی است. دوم، با کاهش عمق آب، برهمکنشی افزایشی وجود دارد، همان‌طور که سطح آب زیرزمینی به مرز زیرین منطقه ریشه نزدیک می‌شود، آب در این منطقه به‌منظور تثبیت تعادل هیدرواستاتیکی با سطح آب زیرزمینی، حرکت می‌کند. سوم، با سطح آب زیرزمینی سطحی و کم‌عمق، برهمکنش تشدید می‌شود. سطح آب

زیرزمینی قویاً مقدار آب را در بخش غیر اشباع منطقه ریشه تحت تأثیر قرار داده و یک مرز متحرک را بین حالت اشباع و غیر اشباع نشان می‌دهد. مدل‌هایی باید موجود باشند که بتوانند این سه حالت متفاوت را شبیه‌سازی نمایند. از جمله محدودیت‌های دیگر در مطالعات سابق، عدم واسنجی مدل و یا واسنجی دو مدل ساخته شده به‌صورت جداگانه و سپس ایجاد مدل یکپارچه است. بدیهی است که واسنجی دو مدل به‌صورت مجزا و بدون درگیرکردن پارامترهای مرتبط در مدل نمی‌تواند تمامی جوانب یک مدل‌سازی پیوسته را در برگیرد. اما در سال‌های اخیر اصلاحاتی روی کُد ارائه شده توسط بِیلی و همکاران (۴) انجام شد که قابلیت‌هایی را به کاربرد آن اضافه کرد، به‌طوری که حتی بتوان از آن برای حوضه‌های بزرگ مقیاس نیز استفاده کرد. در مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی تلفیقی پیچیدگی‌های تبادلات آبی در حوضه، به‌عنوان مثال ترکیبی از استخراج آب زیرزمینی برای آبیاری و بهره گیری از آب سطحی جهت آبیاری، نشت از کانال‌ها، نشت از منابع تغذیه مصنوعی و غیره در نظر گرفته نمی‌شد (۱۸). از مزیت‌های مدل اصلاح‌شده می‌توان پیوند بین پمپاژ از مدل آب زیرزمینی MODFLOW، در قالب بسته چاه، با واحدهای هیدرولوژیکی (HRUs) در معرض آبیاری مدل با مدل SWAT و همچنین کمّی‌سازی مقادیر آبیاری در دو حالت برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی را اشاره کرد (۲). همچنین، انجام واسنجی توأمان و یکپارچه بر پارامترهای دو مدل بعد از ساخت مدل‌ها و فرایند یکپارچه‌سازی آنها از قابلیت‌های دیگر مدل اصلاح‌شده است. اگرچه مدل هنوز هم بی اشکال نبوده و در حال حاضر ابزاری برای واسنجی همزمان دو مدل در آن تعبیه نشده و در برخی مطالعات انجام‌شده، واسنجی توأمان یا از طریق برنامه ویژوال بیسیک در محیط اکسل برنامه‌نویسی شده (۱۸)، یا از طریق برنامه PEST (Parameter Estimation) جهت درگیرکردن پارامترهای مدل MODFLOW در فرایند واسنجی (۲۲)، از طریق پارامترهای ورودی (هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه) جهت دستیابی به پارامترهای خروجی آب زیرزمینی نظیر (تراز سطح ایستابی هر چاه، بیلان آبی و غیره) صورت گرفته است.

نتیجه‌گیری

در یک سامانه هیدرولوژیک، آب زیرزمینی و سطحی از هم جدا نبوده و از لحاظ فیزیوگرافی و آب و هوایی با یکدیگر در ارتباط می‌باشند. بنابراین، توسعه یکی از آنها بر دیگری اثر خواهد گذاشت. بنابراین، آگاهی از مفاهیم اساسی برهمکنش بین این دو سامانه برای مدیریت مؤثر منابع آب ضروری است. شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی تحت شرایط کمبود و عدم قطعیت داده‌ها با اجرای تلفیقی مدل‌ها می‌تواند برخی نیازهای مرزی هر دو مدل را تأمین کرده و منجر به بهبود نتایج شبیه‌سازی شود. مقایسه نتایج مدل تلفیقی با اجرای هر یک از مدل‌ها به تنهایی، نشان داد که تلفیق دو مدل تا چه حد توانسته در افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها مؤثر باشد. با استفاده از مدل تلفیقی می‌توان منطقه را به زیرحوضه و سلول‌های کوچکتر تقسیم و معادله حاکم را در هر حوضه یا سلول حل کرد و مؤلفه‌های بیلان آب را در سطح زیرحوضه و درنهایت بیلان کل حوضه برآورد کرد و همچنین اثر سناریوهای مختلف مدیریتی بر تبادل جریان بین آبخوان و رودخانه، پیش‌بینی آثار آبیاری کشاورزی بر رواناب سطحی، بهبود ارزیابی اثرات محیطی و انسان‌زاد روی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در مقیاس حوضه را بررسی کرد. از جمله مزایای مدل یکپارچه این است که تغییرات فصلی تراز سطح ایستابی و تغذیه نسبت به کاربرد تنها مدل آب زیرزمینی، دقیق‌تر پیش‌بینی می‌شود. مزیت دیگر مدل، بهبود واسنجی مدل است که به‌صورت توأمان برای هر دو مدل انجام می‌شود. همچنین، توسعه یک سامانه پشتیبان تصمیم‌یار بر پایه گرافیکی نیز کاربر را قادر می‌سازد که به راحتی حالات مدل معین را اصلاح و الگوهای برداشت آب را اجرا، شبیه سازی و نیز اثر هیدرولوژیکی این قبیل اصلاحات و

تغییرات را روی جریان‌های رودخانه و تراز آب نشان دهد. یافته‌های علمی و متداول امروزه پیشرفت‌هایی داشته در نقطه‌ای که مدیریت آب زیرزمینی، دیگر فکر جدایی از مدیریت آب‌های سطحی را ندارد. بنابراین، مدل‌های یکپارچه حوضه که تلاش در نشان‌دادن تمام فرایندهای مربوط در سیستم هیدرولوژیکی را دارند لازم است تصمیمات پشتیبانی برای مدیریت منابع آب مناطق بزرگ را اتخاذ کنند. در واقع می‌توان گفت مدل‌سازی یکپارچه حوضه برای مدیریت یکپارچه آن ضروری است.

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K. C. 2009. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs version 2 Manual.
2. Aliyari, F., R. T. Bailey, A. Tasdighi, A. Dozier, M. Arabi and K. Zeiler. 2019. Coupled SWAT MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins. *Environmental Modelling and Software* 115:200-210.
3. Ashraf, S., A. Nazemi and A. AghaKouchak. 2021. Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports* 28:11(1):1-0.
4. Bailey, R.T., T.C. Wible, M. Arabi, R.M. Records and J. Ditty. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrological Processes* 30(23):4420-4433.
5. Bejranonda, W., M. Koch and S. Koontanakulvong. 2011. Surface water and groundwater dynamic interaction models as guiding tools for optimal conjunctive water use policies in the central plain of Thailand. *Environmental Earth Sciences* 70(5):1-8.
6. Chung, I. M., N. W. Kim, J. Lee and M. Sophocleous. 2010. Assessing distributed groundwater recharge rate using integrated surface water-groundwater modelling: application to Mihocheon watershed, South Korea. *Hydrogeology* 18(5): 1253-1264.
7. Demlie, M. 2015. Assessment and estimation of groundwater recharge for a catchment located in highland tropical climate in central Ethiopia using catchment soil–water balance (SWB) and chloride mass balance (CMB) techniques. *Environmental Earth Sciences*74(2):1137-50.
8. Dolatabadi, S. and S. M. A. Zomorrodian. 2014. Application of recharge rates extracted from SWAT Model in MODFLOW mathematical model for simulation of groundwater flow in Firoozabad plain. *Journal of Water and Soil sciences* 19(71):337-347 (In Farsi).
9. Galbiati, L., F. Bouraoui, F. J. Elorza and G. Bidoglio. 2006. Modeling diffuse pollution loading into a Mediterranean lagoon: development and application of an integrated surface–subsurface model tool. *Ecological Modelling* 193 (1-2): 4-18.
10. Guzha, A. Ch. 2008. Integrating surface and subsurface flow models of different spatial and temporal scales using potential coupling interfaces. Ph.D. Thesis, Utah state university, Utah, USA.
11. Guzman, J.A., D. N. Moriasi, P. H. Gowda, J. L. Steiner, J. G. Arnold, R. Srinivasan and P. J. Starks. 2015. A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. *Environmental Modeling and Software* 73:103-116.
12. Izadi, A., K. Davari, A. Alizadeh, A. N. Ziaei, A. Alipoor, A. Joodavi and M. L. Brusseau. 2013. A framework toward developing a groundwater conceptual model. *Saudi Society for Geoscience* 7: 3611-3631.
13. Kim, N. W., I. M. Chung, Y. S. Won and J. G. Arnold. 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *Hydrology Journal* 356: 1-16.
14. Kouchakzadeh, M. H. and F. Nasiri Saleh. 2014. Evaluation of the efficiency of using surface water simulation results to improve the accuracy of groundwater simulation. *Modarres Civil Engineering Journal* 14(3):129-206 (In Farsi).
15. Liu, W., S. Park, R. T. Bailey, E. Molina-Navarro, H. E. Andersen, H. Thodsen, A. Nielsen, E. Jeppese, J. S. Jensen, J. B. Jensen and D. Trolle. 2019. Comparing SWAT with SWAT-MODFLOW hydrological simulations when assessing the impacts of groundwater abstractions for irrigation and drinking water. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 1-151
16. Luo, Y. and M. Sophocleous. 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* 3(3):164-173.
17. McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *In:* Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, U.S. Geological Survey, 588.

18. Naeb, S., S. Javadi and M. E. Banihabib. 2020. Application of SWAT-MODFLOW Integrated model for simultaneous modelling of surface and groundwater to improve basin-scale water resources system status, Iran. *Water Resources Research* 16(1):42-58 (In Farsi).
19. Nasiri, sh., N. Farrahi, A. N. Ziaei. 2020. Investigating of surface and groundwater changes in Semnan watershed using the SWAT model. *Journal of Water and Soil sciences* 24(2):251-266 (In Farsi).
20. Nasiri, sh., H. Ansari, A.N. Ziaei. 2020. Simulation of river flow in Samalqan watershed using the hydrological Model SWAT. *Journal of Water Resources Engineering* 13(2):39-56 (in Farsi).
21. Nasiri, sh., H. Ansari and A. N. Ziaei. 2020. Simulation of water balance equation components using SWAT model in Samalqan Watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 13(421): 1-15.
22. Saadatpour, A., A. Alizadeh, A. N. Ziaei and A. Izady. 2019. Estimation and comparisin of Blue and Green water using SWAT-MODFLOW models in the Neishabour watershed. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 13(4):1113-1129 (In Farsi).
23. Scanlon, B. R., R.W. Healy and P.G. Cook. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10(1):18-39.
24. Sophocleous, M. A., J. K. Koelliker, R. S. Govindaraju, T. Birdie, S. R. Ramireddygari and S. P. Perkins. 1999. Integrated numerical modeling for basin wide water management: the case of the Rattlesnake Creek basin in South Central Kansas. *Journal of Hydrology* 214 (1-4): 179-196.
25. Sophocleous, M. and S. P. Perkins. 2000. Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. *Journal of Hydrology* 236:185-201.
26. Zhang, Q. and L. Lijiao. 2009. Development and application of an integrated surface runoff and groundwater flow model for a catchment of Lake Taihu watershed, China. *Quaternary International* 208:102-108.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 1, Spring 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Investigation of Integrated Modeling of Surface Water- Ground Water Using SWAT- MODFLOW Model

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

(Received: January 23-2021; Accepted: June 16-2021)

Abstract

Hydrological models are useful tools in water resources planning, but some of them do not have satisfactory performance on a regional scale. Hydrological models are appropriate for a specific spatial scale and the lack of input data is a limiting factor in the modeling. One way to overcome this limitation is by using a flexible comprehensive model in different watersheds. Since surface and ground water have dynamic interaction in environmental ecosystems and form a combined water resources system so, the application of two general methods including fully integrated and coupled regions has been evaluated in this research. An investigation of these methods showed that the major focus in most studies is on increasing the accuracy of recharge and evapotranspiration rates in simulation. The results showed that the simultaneous use of SWAT and MODFLOW models to understand the hydrological conditions in a region has been able to cover the defects associated with the semi-distributional and distributive constraints of two models, simulating the surface-groundwater and the interaction between the aquifer and river. This method can provide useful information about the water balance of the basin and help to plan water resources more accurately.

Keywords: Ground water, Surface water, Integrated model, MODFLOW model, SWAT model

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