اکوهیدرولوژی
دورهٔ ۹، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۱، ص ۲۱۰-۱۹۹

شبیه‌سازی تبادلات آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW-OWHM (منطقهٔ مورد مطالعه: دشت شازند)

فرزانه سلطانی[۱]، سامان جوادی[۲*]، عباس روزبهانی[۲]، علیرضا مساح بوانی[۲]، سعید لطفی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. کارشناس ارشد، بخش سیاست‌گذاری و تخصیص منابع آب، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا، وزارت نیرو، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۰۱؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۲/۰۹؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۱/۲۱)

چکیده

افزایش بی‌رویهٔ جمعیت در کشور، محدودیت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بیش از اندازه از آبخوان‌ها باعث وارد آمدن خسارت‌های جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی کشور در سال‌های گذشته شده که توجه به مدیریت یکپارچهٔ منابع آب را ضروری کرده است. امروزه، مدل‌های هیدرولوژیکی یکپارچه با امکان تجزیه‌وتحلیل آب‌های زیرزمینی و سطحی با وضوح زمانی و مکانی بالا اجرای بهتر و دقیق‌تر این مدیریت را امکان‌پذیر ساخته‌اند. این مطالعه با هدف درک تعاملات آب‌های زیرزمینی با آب‌های سطحی در آبخوان دشت شازند در استان مرکزی با استفاده از مدل MODFLOW-OWHM تحت رابط کاربری گرافیکی ModelMuse شبیه‌سازی شده است. در این مطالعه از بستهٔ SFR برای شبیه‌سازی جریان رودخانه و تبادلات آن با آبخوان استفاده شد. واسنجی مدل به صورت دستی برای مهرماه ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۰ انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داد رودخانه‌های دشت شازند سهم بسیار اندکی در تغذیه و تخلیهٔ آبخوان دارند و بیشترین نفوذ از رودخانه به آبخوان در ماه فروردین با ۱۹۸۲ مترمکعب بر روز و کمترین میزان در شهریورماه با ۳۷۳ مترمکعب بر روز اتفاق می‌افتد. بیشترین سهم در تغذیهٔ آبخوان در بیشتر ماه‌های سال نفوذ ناشی از بارش است و بیشترین سهم تخلیه نیز در ماه‌های خشک سال مربوط به تخلیه از چاه‌ها و در باقی ماه‌ها شار وابسته به هد است. از این‌رو، این مطالعه می‌تواند یک پایهٔ قوی برای مطالعات بیشتر برای ارزیابی تغییرات اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی و استراتژی‌های مدیریت منابع آب در کشور باشد.

کلیدواژگان: مدل یکپارچهٔ هیدرولوژیکی، تبادل آب‌های سطحی و زیرزمینی، مدل عددی، MODFLOW-OWHM

* نویسندهٔ مسئول

Email: javadis@ut.ac.ir

مقدمه

تعامل بین آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی (به عنوان مثال، رودخانه، نهر، دریاچه، تالاب، چشمه و غیره) جنبهٔ مهمی از چرخهٔ آب است، زیرا می‌تواند بر استفاده از منابع آب توسط انسان‌ها تأثیر بگذارد [۱]. چرخهٔ هیدرولوژیکی، کل مجموعه سیستم‌ها و فرایندهای پیچیدهٔ درون هر سیستم، یعنی اتمسفر، سطح زمین و زیرسطح را ادغام می‌کند. با این‌حال، اغلب تحقیقات گذشته مبادلهٔ بین پویایی آب‌های سطحی و زیرزمینی را نادیده گرفته یا ساده کرده است [۲-۴]. اما در دهه‌های اخیر مطالعات تعاملات آب‌های سطحی و زیرزمینی در زمینهٔ مدیریت منابع‌آب توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. به دلیل این واقعیت که سیستم‌های جریان آب‌سطحی و زیرزمینی، در بسیاری از موارد، با یکدیگر عمل می‌کنند. به عنوان مثال، برداشت آب‌های زیرزمینی می‌تواند جریان پایه را کاهش دهد و بر هیدرولوژی رودخانه تأثیر منفی بگذارد. به‌عکس، برداشت آب‌های سطحی می‌تواند تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی را کاهش دهد. علاوه بر این، آب‌های سطحی می‌توانند از آب‌های زیرزمینی املاح بگیرند و همین‌طور کیفیت آب‌های زیرزمینی توسط آب‌های سطحی نیز مختل می‌شود [۵].

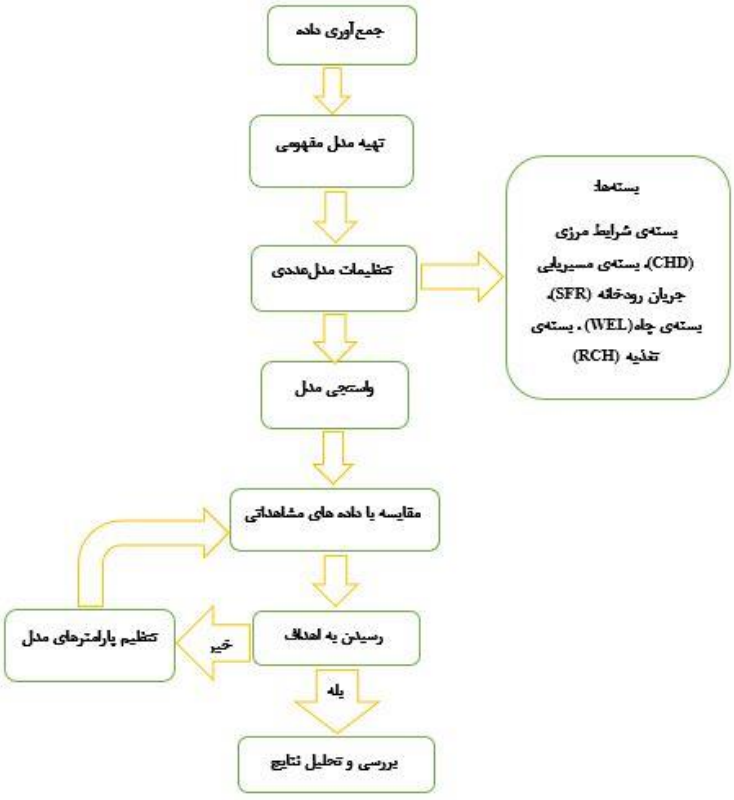
پیشرفت روزافزون امکانات در محاسبات باعث شده است که سیستم‌های جریان با هم در دو حوزهٔ فضایی و زمانی تجزیه‌وتحلیل شوند. تجزیه‌وتحلیل جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی از طریق مدل‌های یکپارچه انجام می‌شود. مدل‌های هیدروژئولوژیکی یکپارچه، فرایندهای بازخوردی را در نظر می‌گیرند که بر زمان و میزان تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان غیر اشباع و فعل و انفعالات آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارد [۶]. بر اساس اطلاعات NGWA (۲۰۱۹)، مدل‌های هیدروژئولوژیکی یکپارچه بسته به معادلهٔ حاکم مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان‌های اشباع و غیر اشباع و سطح یکپارچگی در زیرسیستم‌ها، به سه دسته تقسیم می‌شوند [۷]. مدل‌های کاملاً یکپارچه (مثل MIKE SHE، [۸]) که هم‌زمان معادلهٔ حاکم بر آب‌های سطحی (معادلهٔ Saint Venant که جریان ناپایدار در سطح زمین را توصیف می‌کند) و جریان آب زیرزمینی (معادلهٔ Richards) حل می‌کند. ۲) مدل‌های هم‌بستهٔ خودکار که مناطق جداگانه‌ای از سیستم‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی را شبیه‌سازی کرده و آن‌ها را از طریق پیوندهای شرایط مرزی یکپارچه می‌کند (مانند GSFLOW، [۶]). ۳) مدل‌های هم‌بستهٔ دستی که از مدل‌های جداگانهٔ آب‌های سطحی و زیرزمینی استفاده می‌کنند و به طور مستقل تنظیم شده و با داده‌های مشاهده‌ای مشترک کالیبره شده‌اند (مثل SWAT-MODFLOW، [۹]).

مدل MODFLOW-OWHM[1] نوعی مدل هیدرولوژیکی یکپارچهٔ مبتنی بر MODFLOW است که تا به امروز کامل‌ترین نسخه از این خانواده است که به طور کامل حرکت و استفاده از آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی و آب‌های واردشده را به هم متصل می‌کند. MF-OWHM اجازهٔ شبیه‌سازی، تجزیه‌وتحلیل و مدیریت کلیهٔ مؤلفه‌های حرکت و استفاده از آب را در یک چارچوب عرضه و تقاضا می‌دهد. این مدل گزینه‌های بیشتری را برای خواص هیدرولیکی و تبخیر نسبت به سایر نسخه‌های MODFLOW فراهم می‌کند. Bushira و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای برای درک پویایی فعل و انفعالات آب‌های زیرزمینی و سطحی در حوضهٔ رودخانهٔ کلرادو در مکزیک با استفاده از مدل MODFLOW-OWHM انجام دادند. در این مدل تعاملات آب‌های سطحی و زیرزمینی از طریق بسته‌های رودخانه، جریان منطقه غیراشباع، چاه، زهکشی، شرایط مرزی جریان و بستهٔ مشاهدهٔ تراز شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها در حالت پایدار نشان داد منابع اصلی تأمین آب‌های زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه، نشت از جریان رودخانه، ورود آب از کشاورزی و جریان‌های زیرسطحی از زهکش است. همچنین، مشخص شد آب‌های زیرزمینی تقریباً از تمامی جهات به سمت خلیج کالیفرنیا در جریان است [۵]. Ebrahim و همکاران (۲۰۱۹) سیستم جریان آب زیرزمینی را با استفاده از مدل MODFLOW-OWHM برای منطقه‌ای در در آفریقای جنوبی که در آن برداشت آب زیرزمینی برای آبیاری طی سال‌های گذشته دو برابر شده بود را شبیه‌سازی کردند. یک مدل بارش رواناب نیز با استفاده از سیستم مدل‌سازی بارش- رواناب PRMS ساخته شد و با دبی خروجی حوضه کالیبره شد. تبادل جریان بین رودخانه و آبخوان نیز با استفاده از پکیج SFR2 شبیه‌سازی شد. تبخیر و تعرق شبیه‌سازی‌شده در PRMS کمتر از مدل MODFLOW-OWHM بود و همین‌طور

1. One Water Hydrologic Flow Model

جریان رودخانهٔ شبیه‌سازی‌شده، با این‌حال همبستگی خوبی بین رواناب‌های شبیه‌سازی‌شده در هر دو مدل وجود دارد. نتایج نشان داد میزان تغذیه از ۱/۳ تا ۴۴/۵ میلی‌متر در سال متفاوت است که بخش ثابتی از بارندگی نیست و رودخانه میزان ۱/۱ درصد از بارندگی سالانه را به آبخوان انتقال می‌دهد که نشان‌دهندهٔ وجود سیستم متغیر است که تحت تأثیر تغییر اقلیم و تغییرات انسانی آسیب‌پذیر است [۱۰]. Azeref و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی از مدل MODFLOW-OWHM در حوضه‌ای در اتیوپی برای بررسی پاسخ سیستم آب‌های سطحی و زیرزمینی به تغییرات آتی استفاده کردند. سناریوهای بررسی‌شده عبارت‌اند از: تأثیر افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی و اثر کاهش تغذیه. هنگامی که میزان برداشت آب زیرزمینی افزایش می‌یابد، نشت جریان از آبخوان به رودخانه و خروجی زیرسطحی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این مطالعه از دست دادن آب زیرزمینی از طریق تبخیر و تعرق در منطقهٔ مطالعه‌شده نیز کاهش یافته است. نتایج مدل نشان می‌دهد سیستم آبخوان نسبت به تغییر هدایت هیدرولیکی بسیار حساس است. طبق نتایج تأثیر افزایش برداشت از چاه به میزان ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد منجر به کاهش تراز آب‌های زیرزمینی به میزان ۶/۷۷، ۱۲/۱۵ و ۲۴/۳۷ متر و کاهش نشت از رودخانه به مقدار ۱/۰۴، ۲/۱۸ و ۴/۴۶ درصد خواهد شد، در حالی که کاهش تغذیه با همان درصدها منجر به کاهش تراز آب‌های زیرزمینی به میزان ۴/۲۷، ۶/۳۴ و ۱۱/۲۵ متر و کاهش نشت به مقدار ۴/۱۹، ۸/۰۵ و ۱۵/۵۵ درصد خواهد شد [۱۱].

در تحقیقات گذشته سیستم‌های جریان آب سطحی و زیرزمینی بیشتر به صورت جداگانه مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته‌اند و مطالعاتی که به صورت توأمان به بررسی تبادل آب‌های سطحی و زیرزمینی پرداختند، بیشتر با مدل SWAT–MODFLOW انجام شده که تمرکز اصلی آن بر آب‌های سطحی است، اما در این مطالعه شبیه‌سازی کمی با مدل جدید MODFLOW-OWHM با هدف تحلیل تبادلات بین آبخوان و رودخانه در حوضهٔ مورد نظر که در سال‌های اخیر شاهد نقصان شدید آب‌های سطحی و همچنین، افت آب‌های زیرزمینی بوده، انجام شده است. در شکل ۱ روند کلی این تحقیق ارائه شده است.



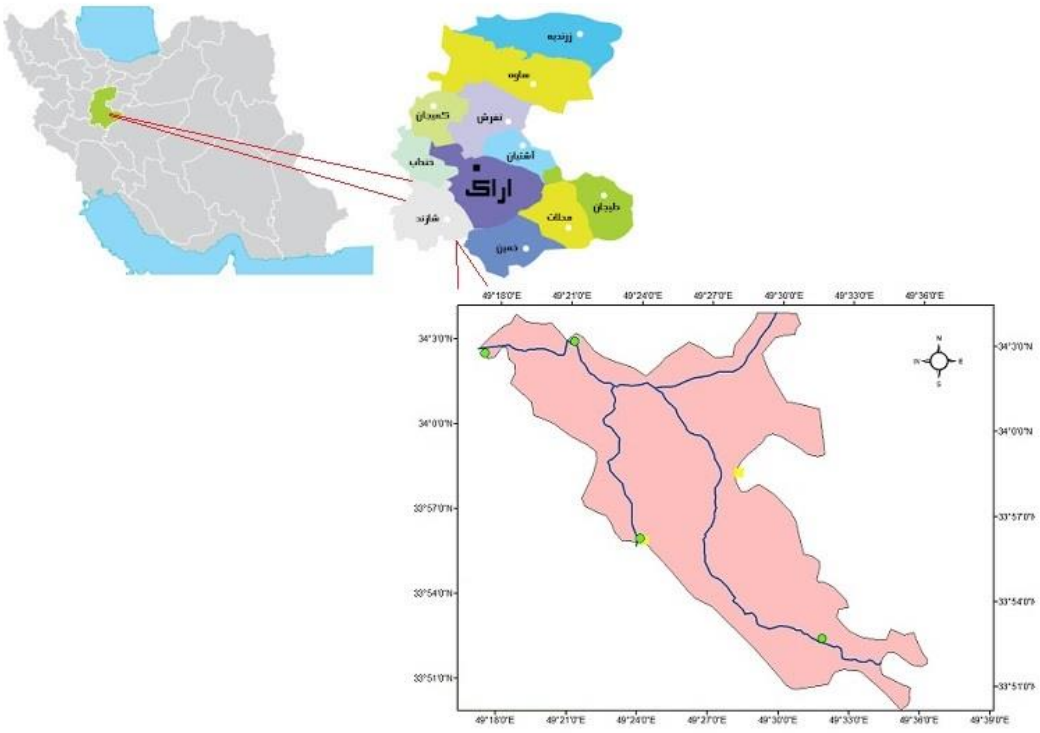
شکل ۱. روند کلی مطالعه

روش کار (مواد و روش‌ها)

منطقهٔ مطالعه‌شده

محدودهٔ مطالعاتی شازند در حوضهٔ آبریز قره‌چای از زیرمجموعهٔ حوضهٔ آبریز سفیدرود است. این محدوده با وسعتی حدود ۹۸۴/۷۳ کیلومتر مربع در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقهٔ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۱ دقیقهٔ شمالی واقع شده است. این منطقه از شمال به دشت کمیجان (بلوک شرا)، از شرق و شمال شرقی به شهرستان اراک، از جنوب به استان لرستان و از غرب به شهرستان‌های ملایر و بروجرد محدود است. در شکل ۲ موقعیت آبخوان شازند در استان مرکزی و ایران نشان داده شده است.

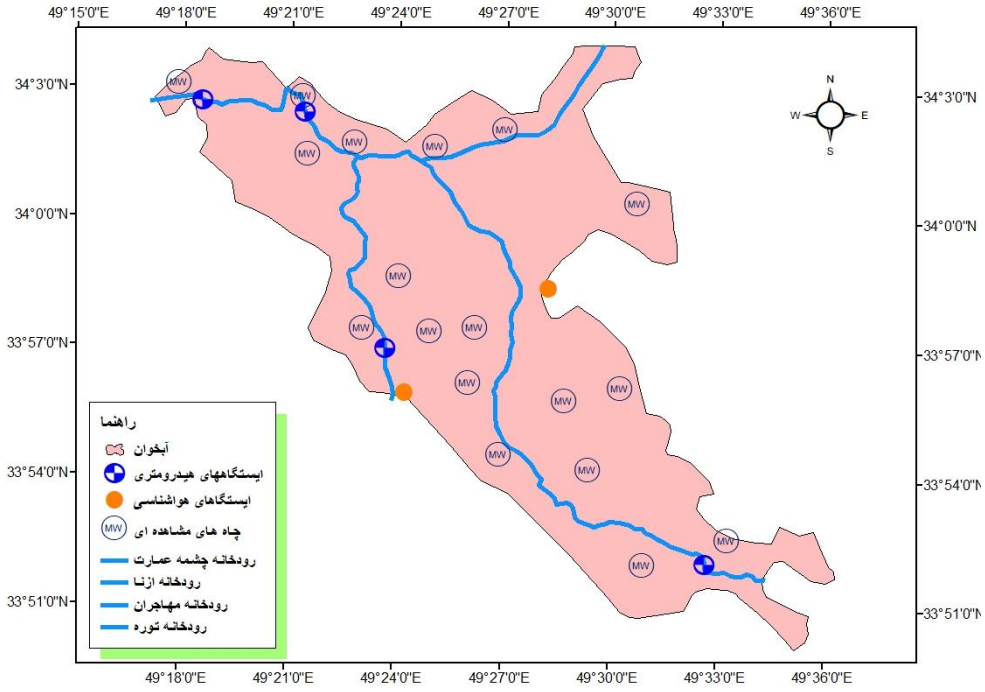
منطقهٔ شازند از سردترین مناطق استان مرکزی است. هوای این منطقه به علت وجود کوهستان و ارتفاع ۱۹۲۰ متری از سطح دریا تابستانی خنک و زمستانی بسیار سرد دارد. میانگین دمای این منطقه در گرم‌ترین فصل سال حداکثر ۳۳ درجهٔ سانتی‌گراد و در سردترین فصل سال حداکثر ۲۵- درجهٔ سانتی‌گراد است. باتوجه به واقع شدن محدودهٔ مطالعاتی شازند در دامنه‌های شرقی رشته‌کوه‌های زاگرس، بیشتر بارش‌های آن ناشی از توده‌های هوای باران‌زایی است که از سمت غرب، شمال غرب و جنوب غرب کشورمان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این توده‌ها در گذر خود از دامنه‌های غربی کوه‌های زاگرس بیشتر رطوبت خود را از دست می‌دهند و به همین دلیل، در دامنه‌های شرقی آن بارش‌های کمتری را باعث می‌شوند. میانگین بلندمدت بارندگی برای کل منطقه حدود ۴۵۶ میلی‌متر در سال است. رودخانهٔ قره‌چای که یکی از رودخانه‌های مهم حوضهٔ آبریز مرکزی است از ارتفاعات جنوب شازند و دامنه‌های شمالی و شمال شرقی کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و محدودهٔ مطالعاتی شازند و شرا در سرشاخهٔ این رودخانه قرار دارند. از لحاظ آب زیرزمینی در دشت شازند هرچه از سمت غرب، جنوب غرب و شمال غرب به سمت شرق نزدیک‌تر می‌شویم، به عمق آب زیرزمینی افزوده می‌شود. بر اساس آخرین سال آماربرداری چاه‌ها ۸۵ درصد، قنوات ۹ درصد و چشمه‌ها ۶۱ درصد از کل تخلیهٔ منابع آب زیرزمینی محدودهٔ مطالعاتی شازند را شامل شده‌اند (دفتر مطالعات پایهٔ منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی).



شکل ۲. نقشهٔ منطقهٔ مطالعاتی

جمع‌آوری داده

داده‌های مختلف از منابع مختلف جمع‌آوری، همگن و ادغام شد. داده‌های هواشناسی شامل بارش و تبخیر برای دو ایستگاه باران‌سنجی شازند و تبخیرسنجی قدمگاه در غرب و شرق منطقه جمع‌آوری شد. داده‌های آبدهی رودخانه برای چهار ایستگاه هیدرومتری موجود در منطقه به نام‌های بازنه، ازنا، توره و پل‌دوآب همراه با پروفیل‌های رودخانه و مصارف مستقیم از آن‌ها گردآوری شد. موقعیت قرارگیری ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی و شاخه‌های اصلی رودخانه در منطقه در شکل ۳ نمایش داده شده است. موقعیت ۱۷ چاه مشاهده‌ای موجود در منطقه همراه با تراز آب زیرزمینی آن‌ها و مقادیر برداشت از چاه‌ها به منظور کشاورزی، صنعت و شرب جمع‌آوری شد. همچنین، نقشه‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و نقشهٔ رقوم‌ارتفاعی[1] منطقه نیز از سازمان‌های مربوطه دریافت شد.



شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری، هواشناسی، چاه‌های مشاهده‌ای و شاخه‌های اصلی رودخانه

توصیف مدل هیدرولوژیکی

برای شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی و تبادل آن با آب‌های سطحی در این مطالعه از نسخهٔ دوم مدل MF-OWHM که یک مدل هیدرولوژیکی یکپارچه مبتنی بر MODFLOW است و توسط سازمان زمین شناسی ایالات متحده‌آمریکا[2] طراحی شده، استفاده شده است. مدل MF-OWHM2 بر اساس مدل پرکاربرد MODFLOW [۱۲, ۱۳] جریان آب‌های زیرزمینی را در طیف وسیعی از مقیاس‌های مکانی و زمانی شبیه‌سازی می‌کند. MF-OWHM2 شامل یک مدل آب سطحی است که امکان شبیه‌سازی تقسیم بارش به نفوذ، رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و آبیاری را فراهم می‌آورد [۱۴]. MF-OWHM2 جریان عمودی و افقی آب‌های زیرزمینی را با استفاده از روش تفاضل محدود[3] معادلات سه‌بعدی آب‌های زیرزمینی محاسبه می‌کند و برهم‌کنش آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی را تخمین می‌زند. این جریان‌ها بر اساس خصوصیاتی مانند هدایت هیدرولیکی، ضخامت لایهٔ اشباع و شرایط آب‌وهوایی محاسبه می‌شوند [۱۳, ۱۵]. برای محاسبهٔ جریان بین رودخانه و آبخوان، از قانون دارسی با فرض جریان یکنواخت بین رودخانه و آبخوان در یک مقطع از رودخانه استفاده می‌شود. جریان به صورت رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود:

1. DEM
2. U.S.G.S
3. Finite Difference

$$Q_l = \left(\frac{K_{sb}WL}{m}\right)\left(h_s - h_a\right) \quad (۱)$$

که در این رابطه Q_L حجم جریان بین یک مقطع از رودخانه و آبخوان (L^3/T)، K_{sb} هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه (L/T)، W عرض رودخانه (L)، L طول قسمتی از رودخانه در تبادل با آبخوان (L)، M ضخامت رسوبات بستر رودخانه (L)، h_s هد رودخانه که با اضافه کردن عمق رودخانه به ارتفاع بستر رودخانه به دست می‌آید (L) و h_a هد آبخوان زیر بستر رودخانه (L) است. در این رابطه نشت در سراسر بستر رودخانه می‌تواند بسته به هد رودخانه و هد آبخوان در هر مرحلهٔ زمانی محاسبه شود. حجم آبی که از رودخانه به آبخوان نشت می‌کند، با ضرب میزان نفوذ در مساحت خیس‌شدهٔ رودخانه محاسبه می‌شود. مساحت خیس‌شدهٔ رودخانه ممکن است ثابت باشد یا بر اساس ابعاد مقطع یا دبی تعیین شود.

توسعهٔ مدل مفهومی

شرایط مرزی

در این مطالعه، محدودهٔ منطقه با تعیین شرایط مرزی مشخص شد که مرزهای هیدروژئولوژیکی طبیعی سامانه به عنوان مرزهای مدل در نظر گرفته شدند. زیرحوضهٔ شازند به صورت گودی‌ای است که اطراف آن را کوه‌ها فرا گرفته است و رواناب‌های سطحی جاری شده از طرف مناطق کوهستانی به دشت، موجب ته‌نشینی آبرفت‌ها در دشت شازند شده و در نهایت، آبخوان آبرفتی تشکیل شده است. جریان‌های ورودی منطقه شامل تغذیهٔ آب زیرزمینی از بارندگی، رواناب و دیگر منابع آب سطحی است. جریان خروجی نیز شامل چشمه‌ها، تغذیهٔ جریان‌های سطحی، تبخیر و پمپاژ از چاه‌ها برای مقاصد مختلف است. بسته‌های شرایط مرزی که در این مطالعه استفاده شده‌اند، عبارت‌اند از: بستهٔ CHD که برای شرایط مرزی با بار هیدرولیکی معلوم است و برای جبهه‌های ورودی و خروجی استفاده شده است، بستهٔ تغذیهٔ RCH[1] که برای تغذیهٔ آبخوان از طریق بارندگی و نفوذ استفاده شده، بستهٔ WELL که یک بستهٔ شرایط مرزی ثابت است و پمپاژ یا تزریق آب زیرزمینی را نشان می‌دهد و بستهٔ SFR که برای مسیریابی جریان رودخانه استفاده شده است.

1. Recharge Package

پمپاژ آب زیرزمینی

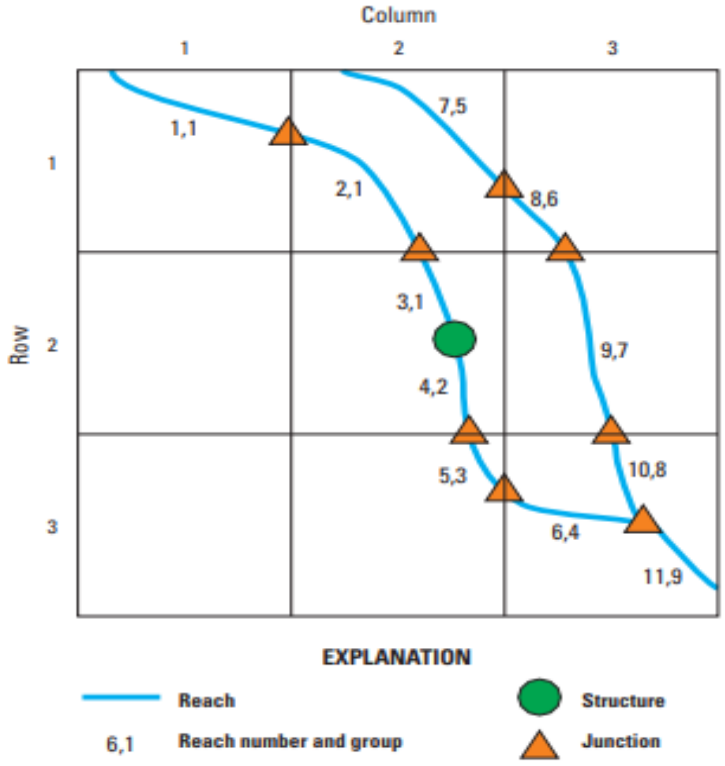
پمپاژ آب کشاورزی و برداشت برای تأمین آب آشامیدنی و صنعتی بر اساس مقادیر گزارش‌شده و برآوردشده مشخص شد. در محدودهٔ دشت شازند تعداد ۳۲ حلقه چاه شرب، ۳۵ حلقه چاه با مصرف صنعتی و ۷۵۶ حلقه چاه با کاربرد کشاورزی وجود دارد. به طور کلی، پمپاژ آب‌های زیرزمینی برای مصرف شرب و صنعت در مقایسه با پمپاژ کشاورزی اندک بود. آب پمپاژشده از چاه‌های بهره‌برداری‌شده در دشت شازند معمولاً در محدودهٔ همان چاه استفاده می‌شود، به همین دلیل متوسط تغذیهٔ حاصل از آب برگشتی چاه‌های بهره‌برداری از میزان تخلیهٔ آن‌ها کسر شده و عدد حاصل به عنوان تخلیه به مدل اعمال شد.

تبادل بین رودخانه و آبخوان

تبادل بین آبخوان و رودخانه با استفاده از SFR شبیه‌سازی شد. جریان رودخانه در این بسته با استفاده از شبکه‌ای از کانال‌ها مسیریابی می‌شود، به گونه‌ای که جریان همیشه در راستای مسیر کانال‌ها است و مقدار تغذیه و تخلیه به آبخوان نیز در هر گام زمانی ثابت فرض می‌شود. کانال‌های رودخانهٔ محدوده به چهار شاخهٔ اصلی تقسیم شدند که همه در شمال منطقه به هم می‌پیوندند و از منطقه خارج می‌شوند که در شکل ۳ مشخص شده است. هر شاخه از رودخانه به عنوان یک Segment در مدل در نظر گرفته شده و هر Segment به تعدادی Reach تقسیم می‌شود. این اصطلاح به قسمتی از یک رودخانه، کانال یا تالاب اشاره دارد که با یک سلول تفاضل محدود خاص برای مدل‌سازی جریان در ارتباط است. هر reach خصوصیات خاص خود شامل میزان جریان ورودی، تبخیر و بارش، پارامترهای هیدرولیکی، هندسهٔ مقطع و... را دارد. همچنین هر reach می‌تواند با یکی از گزینه‌های فعال، غیر فعال یا ثابت مشخص شود. شکل ۴ قسمتی از reach های یک رودخانه را نشان می‌دهد که بر اساس سلول‌ها شماره‌گذاری می‌شوند. مقاطع کانال رودخانه همه هشت‌نقطه‌ای فرض شدند. برای بارندگی و تبخیر مستقیم از کانال رودخانه از اطلاعات نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به هر شاخه استفاده شد و میزان هر یک به واحد متر بر روز وارد مدل شد. برای پارامتر جریان واردشده از بالادست[2] از آمار

2. Flow into upstream end

ایستگاه‌های هیدرومتری موجود استفاده شد و برای شاخه‌هایی که ایستگاه هیدرومتری روی آن موجود نبود یا با ابتدای شاخه فاصله داشت، از روش دبی مساحت، مقدار دبی در ابتدای هر شاخه به دست آمد. پارامتر رواناب در مدل نشان‌دهندهٔ مقدار آب میان حوضه‌ای تشکیل‌شده در هر زیرحوضه است که شاخهٔ مورد نظر در آن وجود دارد که برای این پارامتر نیز از همان اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شده و دبی در انتهای زیرحوضه از دبی در ابتدای زیرحوضه کسر شد. برای مصارف نیز از اطلاعات موجود برداشت‌های مستقیم از رودخانه استفاده شد، اما این پارامتر به صورت مستقیم وارد مدل نمی‌شود و باید برای هر شاخه از مقدار دبی واردشده از بالادست کسر شود و تحت عنوان پارامتر FLOW وارد مدل شود. به منظور پارامتریزاسیون، شاخه‌های رودخانه به دو قسمت بالادست و پایین‌دست تقسیم شد، هدایت هیدرولیکی، عمق رودخانه و ضریب زبری کانال برای هر گروه وارد شد. برای ارتفاع بستر رودخانه و پهنای بستر نیز از نقشهٔ رقوم ارتفاعی و پروفیل رودخانه استفاده شد.



شکل ۴. نمایش Reachهای رودخانه در مدل

گسسته‌سازی مدل

در آبخوان دشت شازند شبکه‌بندی ابعاد سلول‌ها، ۳۰۰ × ۳۰۰ در نظر گرفته شده است. مدل، دشت شازند را به ۶۲ سطر و ۱۱۸ستون تقسیم می‌کند. بنابراین، شبکه‌بندی آبخوان مطالعه‌شده شامل ۷۳۱۶ سلول با ابعاد ۳۰۰ متر است. در این مطالعه، آبخوان شازند تک‌لایه در نظر گرفته شده که ضخامت آبرفت حداکثر تا ۱۲۰ متر است و همچنین، لایهٔ مفروض به صورت قابل تبدیل بین حالت آزاد و تحت فشار در نظر گرفته شده است. دورهٔ شبیه‌سازی دوره‌ای یک‌ساله است که از مهر ۱۳۸۹ آغاز می‌شود و تا پایان شهریور ۱۳۹۰ ادامه دارد. دوره‌های تنش نیز به صورت یک‌ماهه در نظر گرفته شده که همهٔ پارامترها برای هر ماه وارد مدل شد.

یافته‌ها

مدل هیدرولوژیکی در دو مرحله برای داده‌های جریان رودخانه و سطح آب زیرزمینی در ۱۷ چاه مشاهداتی موجود در منطقه واسنجی شده است. در اولین مرحله جریان

مشاهداتی رودخانه در ایستگاه پل‌دوآب در مقایسه با جریان رودخانهٔ شبیه‌سازی‌شده با استفاده از هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه واسنجی شده است است. کمترین مقدار هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه متعلق به بالادست رودخانه‌های ازنا و چشمه عمارت و بیشترین آن نیز مربوط به پایین‌دست رودخانهٔ توره در خروجی حوضه است. دومین مرحلهٔ عملیات واسنجی نیز با استفاده از هدایت هیدرولیکی آبخوان انجام گرفت. دقت در تعیین این پارامتر تأثیر زیادی در دقت سایر عوامل دارد. بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی در نواحی میانی دشت است و در نزدیک ارتفاعات کمترین مقدار خود را دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از دورهٔ واسنجی در تمام چاه‌های مشاهداتی دشت، سطح آب شبیه‌سازی‌شده به سطح آب مشاهداتی تقریباً نزدیک است و جذر میانگین مربعات خطا[1] برای دورهٔ ماندگار (مهرماه) ۱/۶۷ متر به دست آمده است.

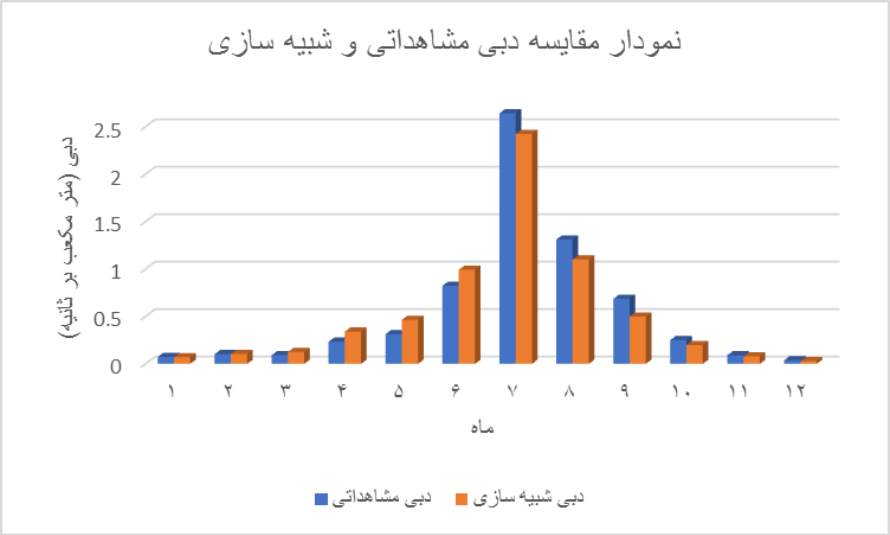
شکل ۵ نمودار مقایسهٔ جریان رودخانه در حالت مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. برای اجرای مدل در مرحلهٔ غیرماندگار از داده‌های آبان ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۰ استفاده شد. پس از اجرای مدل در این مرحله، نتایج نشان داد طراحی مدل در این بازه زمانی نیز قابل قبول بوده و مقدار خطا در محدودهٔ خطای قابل قبول قرار گرفته است. نمودار مقایسهٔ سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای با شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار در شکل ۶ ارائه شده است. شاخص‌های آماری‌ای که مورد استفاده قرار گرفتند، عبارت‌اند از: ضریب تعیین[2]، درصد خطای مطلق[3] و جذر میانگین مربعات خطا که در قسمت جریان رودخانه درصد خطای مطلق اهمیت بیشتری دارد که نتایج حاصل از این قسمت در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است و در قسمت سطح آب زیرزمینی نیز جذر میانگین مربعات خطا اهمیت بیشتری دارد و نتایج آن در جدول ۳ قابل مشاهده است.

همچنین، بستهٔ SFR این قابلیت را دارد که در هر قسمت از هر شاخهٔ رودخانه مقدار جریان تبادل‌یافته بین آبخوان و رودخانه را نشان دهد. بنابراین، بر اساس نتایج این بسته در بیشتر ماه‌ها، بیشترین نفوذ از رودخانه به آبخوان در شمال شاخهٔ چشمه عمارت صورت می‌گیرد و بیشترین نشت از آبخوان به رودخانه در شاخهٔ توره در غرب منطقه اتفاق می‌افتد که با توجه به زیاد بودن تراز آب زیرزمینی در این ناحیه این نتیجه قابل قبول است.

بیلان منابع آب

بودجه آب‌های زیرزمینی فرایندی است برای تعیین کمی شرایط ورودی و خروجی در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی. بر اساس جدول ۳، مقدار ۱۱۵۷۷۷ متر مکعب بر روز آب به سیستم آب‌های زیرزمینی متصل می‌شود و با مقدار ۲۵۷۶۱۰ متر مکعب بر روز از این سیستم در شرایط ماندگار خارج می‌شود. درصد ناسازگاری صفر است که نشان می‌دهد مدل تحت شرایط ماندگار خوب عمل می‌کند. بیلان در این شرایط ۰/۲۶۲- مترمکعب بر روز است. شکل ۷ نمودار درصد ورودی‌ها را برای حالت ماندگار نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۴، نتایج مدل در دوازده ماه سال را نشان می‌دهد. نفوذ از رودخانه به آبخوان کمترین سهم ورودی را در همهٔ ماه‌های سال دارد. در فصل‌های پاییز، زمستان (به‌جز ماه اسفند) و بهار، شار ثابت ورودی بیشترین سهم را در تغذیهٔ آبخوان دارد، اما در فصل تابستان و ماه اسفند نفوذ از بارش بیشتر از شار ثابت ورودی است. در فصل تابستان و ماه مهر برداشت از چاه بیشترین سهم را در تخلیهٔ آبخوان دارد، اما در فصل‌های پاییز (به‌جز ماه مهر)، زمستان و بهار شار ثابت خروجی سهم بیشتری نسبت به برداشت از چاه در تخلیهٔ آبخوان دارد. به طور کلی، در ماه‌های پاییز و زمستان نفوذ از رودخانه به آبخوان بیشتر از نشت آب از آبخوان به رودخانه است و در ماه‌های بهار و تابستان عکس است. بیشترین سرعت نفوذ از رودخانه به آبخوان متعلق به ماه فروردین با مقدار ۱۹۸۲ مترمکعب بر روز و کمترین سرعت برابر با ۳۷۳ مترمکعب بر روز در ماه شهریور است. همچنین، بیشترین سرعت انتقال آب از آبخوان به رودخانه ۲۲۹۶ مترمکعب بر روز در ماه فروردین و کمترین سرعت متعلق به ماه آبان و برابر با ۳۸۲ مترمکعب بر روز است. همچنین، بیلان در همهٔ ماه‌ها به‌جز فروردین و اردیبهشت منفی است.

1. RMSE
2. R^2
3. MAPE



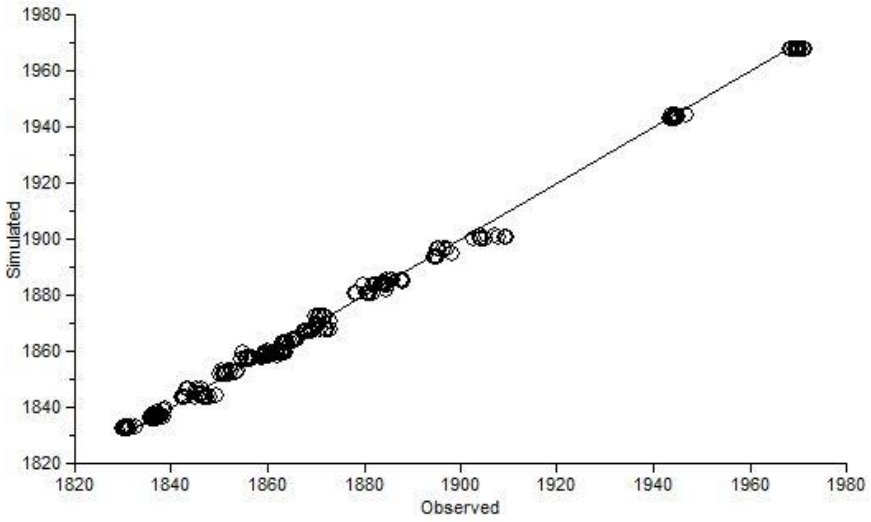
شکل ۵. مقایسهٔ جریان رودخانه در حالت شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در ایستگاه پل‌دوآب (سال ۱۳۸۹ـ ۱۳۹۰)

جدول ۱. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی جریان رودخانه

ماه	مقدار مشاهداتی (مترمکعب بر ثانیه)	مقدار شبیه‌سازی (مترمکعب بر ثانیه)
مهر	۰,۰۴	۰,۰۷
آبان	۰,۱۰	۰,۱۰
آذر	۰,۰۹	۰,۱۲
دی	۰,۲۳	۰,۳۴
بهمن	۰,۳۱	۰,۴۶
اسفند	۰,۸۲	۰,۹۹
فروردین	۲,۶۴	۲,۴۲
اردیبهشت	۱,۳۱	۱,۱۰
خرداد	۰,۶۸	۰,۴۹
تیر	۰,۲۵	۰,۱۹
مرداد	۰,۰۹	۰,۰۸
شهریور	۰,۰۳	۰,۰۲

جدول ۲. خطاهای آماری شبیه‌سازی آب سطحی

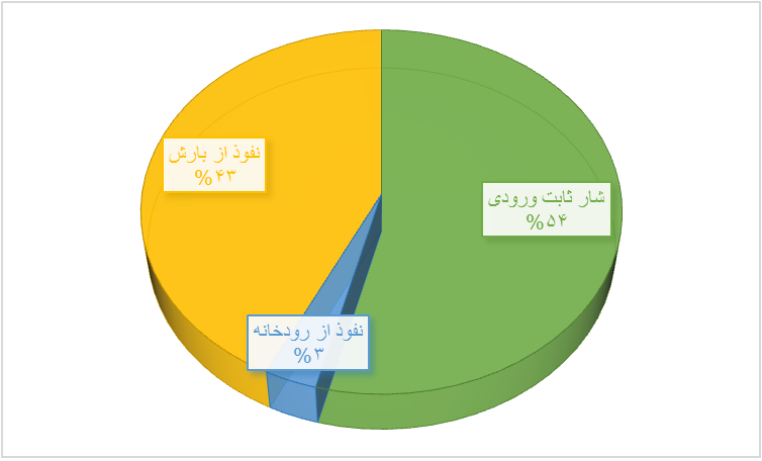
پارامتر خطا	مقدار
ضریب تعیین (R^2)	۰,۹۷۷
درصد خطای مطلق (MAPE)	۰,۲۱
مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)	۰,۱۲۶



شکل ۶. مقایسهٔ سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در حالت ماندگار و غیرماندگار

ماه	R^2	RMSE	MAPE
مهر	۰,۹۹۸	۱,۶۷	۰,۰۰۰۶
آبان	۰,۹۹۸	۱,۶۱	۰,۰۰۰۶
آذر	۰,۹۹۸	۱,۵۱	۰,۰۰۰۶
دی	۰,۹۹۸	۱,۴۹	۰,۰۰۰۶
بهمن	۰,۹۹۸	۱,۳۳	۰,۰۰۰۵
اسفند	۰,۹۹۸	۱,۳۱	۰,۰۰۰۵
فروردین	۰,۹۹۸	۲,۱۶	۰,۰۰۰۹
اردیبهشت	۰,۹۹۷	۲,۰۸	۰,۰۰۰۷
خرداد	۰,۹۹۷	۱,۹۴	۰,۰۰۰۸
تیر	۰,۹۹۸	۱,۶۴	۰,۰۰۰۷
مرداد	۰,۹۹۸	۲,۰۰	۰,۰۰۰۸
شهریور	۰,۹۹۷	۲,۶۶	۰,۰۰۰۸



شکل ۷. درصد ورودی‌های آب زیرزمینی در حالت ماندگار

جدول ۴. نتایج شبیه‌سازی بودجه‌بندی آب

ماه	میزان شار ثابت ورودی (مترمکعب بر روز)	میزان نفوذ از بارش (مترمکعب بر روز)	میزان نفوذ از رودخانه (مترمکعب بر روز)	میزان شار ثابت خروجی (مترمکعب بر روز)	میزان برداشت از چاه (مترمکعب بر روز)	میزان نشت از آبخوان به رودخانه (مترمکعب بر روز)	بیلان (مترمکعب بر روز)
مهر	۱۴۱۲۷۹	۱۱۵۷۷۷	۵۵۲	۳۹۹۲۷	۲۱۶۷۲۸	۹۵۴	-۰,۲۶۲
آبان	۱۴۰۲۹۵	۳۸۸۳۶۱	۶۱۱	۴۰۲۷۸	۲۱۶۷۲۸	۳۲۸	-۱,۹۶E-۲
آذر	۱۳۹۵۶۶	۳۷۴۷۵۱	۶۴۳	۴۰۶۰۹	۲۱۶۷۲۸	۳۶۴	-۳,۱۸E-۲
دی	۱۳۸۰۳۵	۴۹۴۲۹۳	۹۰۱	۴۱۱۶۶	۷۶۷۷	۵۹۱	-۹,۴۳E-۳
بهمن	۱۳۷۵۴۸	۴۵۳۵۷۵	۱۰۲۵	۴۱۵۳۰	۷۶۷۷	۵۹۷	-۲,۰۲E-۲
اسفند	۱۳۳۷۰۳	۱۱۶۶۱۸۴	۱۴۵۸	۴۲۸۸۴	۷۶۷۷	۱۴۴۱	-۶,۸۹E-۳
فروردین	۸۹۳۲۵	۲۹۳۸۱۳۷۳	۱۹۸۲	۱۱۲۰۷۱	۴۸۲۳۸۹	۲۲۹۶	۱,۰۶E-۳
اردیبهشت	۶۳۴۶۶	۴۲۲۹۲۵۱۶	۱۴۰۶	۱۸۷۳۱۰	۴۸۷۳۳۲	۱۴۳۵	۵,۱۷E-۵
خرداد	۶۶۰۴۰	۲۸۲۷۸۴۷	۱۰۴۱	۱۶۹۶۴۸	۴۸۷۳۳۲	۹۸۰	-۱,۰۵E-۵
تیر	۶۹۹۷۶	۲۷۱۴۶۹	۷۴۲	۱۵۶۳۵۸	۷۰۶۷۱۶	۷۴۳	-۲,۵۶E-۵
مرداد	۷۳۰۸۳	۷۰۳۸۴	۵۳۸	۱۴۷۲۳۸	۷۰۶۷۱۶	۵۷۸	-۸,۲۹E-۵
شهریور	۷۵۸۷۶	۹۸۴	۳۷۳	۱۳۹۸۹۲	۷۰۶۷۱۶	۴۰۸	-۱,۶۷E-۴

نتیجه‌گیری

افزایش سریع قدرت محاسباتی رایانه‌های شخصی و در دسترس بودن سیستم‌های مدل‌سازی کاربرپسند، امکان شبیه‌سازی سیستم‌های سطحی و زیرزمینی در مقیاس بزرگ را فراهم کرده است [۵]. در این مطالعه به منظور درک سیستم آب‌های زیرزمینی و تبادل آن با آب‌های سطحی در دشت شازند از مدل هیدروژئولوژیکی یکپارچهٔ سه‌بعدی MODFLOW-OWHM استفاده شد که مدل در یک دورهٔ زمانی یک‌ماهه در حالت ماندگار (مهرماه ۱۳۸۹) و یک دورهٔ یک‌سالهٔ آبی ۱۳۸۹ــ ۱۳۹۰ در حالت غیرماندگار شبیه‌سازی شد. مدل با استفاده از هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه و هدایت هیدرولیکی آبخوان واسنجی شد و نتایج شبیه‌سازی با داده‌های جریان رودخانه و سطح آب زیرزمینی مقایسه شد که با توجه به شاخص‌های آماری ارائه‌شده نتایج شبیه‌سازی قابل قبول بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد رودخانه‌های دشت شازند سهم بسیار اندکی در تغذیه و تخلیهٔ آبخوان دارند و بیشترین میزان نفوذ از رودخانه به آبخوان متعلق به ماه فروردین است که با توجه به دبی رودخانه در این ماه منطقی است و بیشترین سهم در تغذیهٔ آبخوان در بیشتر ماه‌های سال تغذیهٔ ناشی از بارش است و بیشترین سهم تخلیه نیز در ماه‌های خشک سال مربوط به تخلیه از چاه‌ها و در باقی ماه‌ها شار وابسته به هد است. همچنین، با توجه به نتایج روندیابی رودخانه و تبادلات آن با آبخوان برای هر شاخهٔ رودخانه، بیشترین نفوذ از رودخانه به آبخوان در شاخهٔ رودخانهٔ توره در شمال غرب منطقه و همچنین، در شمال منطقه در بالادست شاخهٔ چشمه عمارت اتفاق می‌افتد. سهم به‌سزای بارش در تغذیهٔ آبخوان نشان‌دهندهٔ یک سیستم طبیعی انسانی با وابستگی زیاد به یک منبع بسیار متغیر، آسیب‌پذیر است که با توجه به تغییرات آب‌وهوایی نیاز به مدیریت فعال آب‌های زیرزمینی کاملاً مشهود است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود این مدل در کنار مدل‌های تغییر اقلیم برای بررسی وضعیت آیندهٔ آبخوان استفاده شود. همچنین، می‌توان سناریوهایی نظیر افزایش برداشت از چاه‌ها یا کاهش تغذیه از بارش را برای ارزیابی تأثیر آن‌ها بر میزان تبادلات بین آبخوان و رودخانه مانند پژوهش Azerf و همکاران (۲۰۲۰) به کار برد و یا نظیر تحقیق Fowler و همکاران (۲۰۱۶) نرم‌افزار بهینه‌سازی با این مدل به منظور مدیریت بهتر منابع آب تلفیق کرد [۱۱, ۱۶]. استفاده از مدل‌های مشابه دیگر که برای ارتباط تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی موجود است و مقایسهٔ نتایج آن‌ها با این پژوهش نیز پیشنهاد می‌شود.

منابع

[1].Winter TC. Ground water and surface water: a single resource. Diane Publishing. 1999;1139.

[2].Liang X. A new parameterization for surface and groundwater interactions and its impact on water budgets with the variable infiltration capacity (VIC) land surface model. Journal of Geophysical Research. 2003;108(D16.(

[3].Niu G-Y, Paniconi C, Troch PA, Scott RL, Durcik M, Zeng X, et al. An integrated modelling framework of catchment-scale ecohydrological processes: 1. Model description and tests over an energy-limited watershed. Ecohydrology. 2014;7(2):427-39.

[4].Yeh PJ, Eltahir EA. Representation of water table dynamics in a land surface scheme. Part I: Model development. Journal of Climate. 2005;18(12):1861-80.

[5].Bushira KM, Hernandez JR, Sheng Z. Surface and groundwater flow modeling for calibrating steady state using MODFLOW in Colorado River Delta, Baja California, Mexico. Modeling Earth Systems and Environment. 2017;3(2):815-24.

[6].Markstrom SL, Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E. and Barlow, P.M. GSFLOW-Coupled Ground-water 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). US Geological Survey techniques and methods. 2008:240.

[7].Theodore L, Dupont RR. Water Resource Management Issues: Basic Principles and Applications: CRC Press; 2019.

[8].Abbott MB, Bathurst JC, Cunge JA, O'Connell PE, Rasmussen J. An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen,"SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. Journal of hydrology. 1986;87(1-2):45-59.

[9].Sophocleous M, Perkins SP. Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. Journal of hydrology. 2000;236(3-4):185-201.

[10]. Ebrahim GY, Villholth KG, Boulos M. Integrated hydrogeological modelling of hard-rock semi-arid terrain: supporting sustainable agricultural groundwater use in Hout catchment, Limpopo Province, South Africa. Hydrogeology Journal. 2019;27(3):965-81.

[11]. Azeref BG, Bushira KM. Numerical groundwater flow modeling of the Kombolcha catchment northern Ethiopia. Modeling Earth Systems and Environment. 2020;6(2):1233-44.

[12]. Harbaugh AW, Banta ER, Hill MC, McDonald MG. Modflow-2000, the u. s. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. 2000.

[13]. Harbaugh AW. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA; 2005.

[14]. Alattar MH, Troy TJ, Russo TA, Boyce SE. Modeling the surface water and groundwater budgets of the US using MODFLOW-OWHM. Advances in Water Resources. 2020;143.

[15]. Prudic DE, Konikow LF, Banta ER. A new streamflow-routing (SFR1) package to simulate stream-aquifer interaction with MODFLOW-2000. 2004.

[16]. Fowler K, Jenkins E, Parno M, Chrispell J, Colón A, Hanson R. Integrated Mathematical Analysis of Agricultural Systems and Associated Water Use Impacts Using Coupled Software Frameworks. 2016.