Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال شانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹
Volume 16, No.1, Spring 2020 (IR-WRR)
۴۲-۵۸

# کاربرد مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW جهت مدل‌سازی هم‌زمان آب‌های سطحی و زیرزمینی در راستای بهبود وضعیت سامانه منابع آبی در مقیاس حوضه‌ای

سجاد نائب فاروجی[۱]، سامان جوادی[۲*] و محمدابراهیم بنی‌حبیب[۳]

## چکیده

به‌منظور مدیریت پایدار آب در حوضه آبریز درک کامل از شرایط هیدرولوژیکی و تبادلات آب‌های سطحی و زیرزمینی، از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مقاله از مدل اصلاح شده SWAT-MODFLOW که یک مدل هیدرولوژیکی چندمنظوره و یکپارچه است، جهت شبیه‌سازی کمی فرآیندهای آب سطحی و زیرزمینی و تبادلات هم‌زمان بین این دو سیستم در سطح حوضه آبریز شازند، استفاده شده است. با بکارگیری مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW بر روی حوضه مورد مطالعه، کلیه بسته‌های مرتبط با کد MODFLOW برای آبخوان تک لایه شازند به‌صورت کد نویسی به مدل وارد گردیده است. پس از واسنجی مدل ترکیبی، نتایج واسنجی مدل آب سطحی SWAT برای ایستگاه هیدرومتری پل دوآب واقع در رودخانه شراء و خروجی حوضه، مقدار ضریب $R^2$ و نش- ساتکلیفت به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۶۳ را نشان می‌دهد. در بخش آب زیرزمینی میزان RMSE برای ۱۹ چاه مشاهده‌ای در آبخوان ۱/۷۲ متر به دست آمد که در سطح قابل قبولی قرار دارد. همچنین تمامی تبادلات آبی صورت گرفته در بخش آب سطحی و زیرزمینی در قالب یک جدول بیلان برای کل حوضه ارائه گردید که با توجه به تعداد متغیرهای واسنجی (چاه مشاهده‌ای و ایستگاه هیدرومتری) دارای دقت بالاتری می‌باشد. با توجه نتایج حاصل‌شده در دو بخش آب سطحی و زیرزمینی عملکرد مدل با توجه به یکپارچگی و در نظر گرفتن تمامی تبادلات دو مدل به‌صورت هم‌زمان و در یک منطقه وسیع قابل‌قبول بوده است. به جهت ارزیابی کاربرد مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW در سطح حوضه نیز از مدل مذکور جهت برآورد تأثیر سناریوی کاهش برداشت به میزان ۱۰ درصد از منابع آبی با استفاده از یک شاخص بر روی سامانه منابع آبی موجود، استفاده گردید که نتایج به‌دست‌آمده از شاخص آب در دسترس WAI، استفاده‌شده در این مطالعه، بیان‌گر بهبود در مقدار شاخص مذکور و درنتیجه بهبود وضعیت سامانه منابع آبی در مقایسه با وضع موجود بود.

***کلمات کلیدی:*** مدل SWAT، MODFLOW، مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW، شاخص WAI.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۴/۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۹/۲۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
۳- استاد گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

# Application of SWAT-MODFLOW Integrated Model for Simultaneous Modeling of Surface and Groundwater to Improve Basin-Scale Water Resources System Status

*S. Naeb [1], S. Javadi [2*], and M.E. Banihabib [3]*

## Abstract

In order to ensure sustainable water management in the catchment, a thorough understanding of the hydrological conditions and the interactions between surface and ground waters. In this paper used from corrected multifunctional and integrated hydrologic model SWAT-MODFLOW, to simulation quantitative processes of surface and ground water and simultaneous exchanges between the two systems at the Shazand catchment area. Using the integrated SWAT-MODFLOW model, added All packages associated with MODFLOW code for Shazand single layer aquifers coded into the model. After the calibration of integrated model, results of calibration swat surface water model to Duab bridge hydrometrical station that located at the Shara river and the basin's output, shown coefficient value of $R^2$ and Nash-Sutcliff 0.64 and 0.63, respectively. At the groundwater part, the amount of RMSE for 19 observational wells in the aquifer calculated 1.72 m that is an acceptable level. Moreover, all water budget parameters performed in the surface and ground water section were presented in the form of bill for the whole basin which is due to the number of calibration variables (Observation well and hydrometric station) has a higher accuracy. With regard to the results obtained in the two surface and ground water sections, the performance of the model with regard to the integrity and consideration of all exchanges of the two models is concurrently and in a wide area acceptable and can recommended use from integrated SWAT-MODFLOW model In integrated simulation of the hydrological conditions of the catchment in a comprehensive manner. To evaluate the application of SWAT-MODFLOW integrated model at the basin level, the model was used to estimate the impact of a 10% reduction in water resources scenario using an index on the existing water resources system, the results obtained from the water index. The availability of WAI used in this study indicates an improvement in the value of the indicator and thus an improvement in the status of the water resources system compared to the status quo.

***Keywords:*** SWAT, MODFLOW, Integrated SWAT-MODFLOW Model, WAI Index.
Received: June 29, 2019
Accepted: December 13, 2019

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, College of Abourayhan, University of Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Abourayhan, University of Tehran, Iran. Email: Javadis@ut.ac.ir
3- Professor, Department of Water Engineering, College of Abourayhan, University of Tehran, Iran.
*- Corresponding author



www.SID.ir

Archive of SID

## ۱- مقدمه

به‌منظور مدیریت پایدار آب در حوضه یک آبریز وسیع، درک کامل از شرایط هیدرولوژیکی، تبادلات آب‌های سطحی و زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از اهمیت خاصی برخوردار است (Fleckenstein et al., 2010). این در حالی است کـه بخش قابل‌توجهی از جهان در مناطق نیمه‌خشک و خشک زندگی می‌کنند (United Nations, 2014). از طرف دیگر با توجه به اینکه در یک سیستم آبی واقعی، آب زیرزمینی و آب سطحی از هم مجزا نبوده و ازلحاظ فیزیوگرافی و ساختار طبیعی با یکدیگر در ارتباط می‌باشند، لذا توسعه‌ی یکی از آن‌ها مطمئناً بر دیگری تأثیر خواهد گذاشت؛ بنابراین آگاهی از مفاهیم اندرکنش آب سطحی و آب زیرزمینی و تدقیق مقادیر آن برای مدیریت مـؤثر یک حـوضه آبریز ضروری می‌بـاشد (Sophocleous, 2002). به‌عبارت‌دیگر مدیریت یکپارچه یک سیستم پیچیده منابع آبی بزرگ‌مقیاس که شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی است مدل‌سازی دقیق‌تر و واقعی‌تر اندرکنش آب سطحی و آب زیرزمینی ضروری می‌باشد. جهت مدیریت یکپارچه نیاز به یک مدل فیزیکی و توزیعی هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی بوده که توانایی کمی‌سازی منابع آب قابل‌دسترس تحت شرایط کنونی و شرایط آتی و نیز تعیین سیاست‌های مدیریت یکپارچه منابع آب را داشته باشد.

به‌طورکلی مدل‌های هیدرولوژیکی در دو تقسیم‌بندی اصلی، فرآیندهای هیدرولوژیکی را در یک حوضه آبریز شبیه‌سازی می‌نمایند. دسته اول شامل مدل‌هایی است که بر اساس رواناب سطحی واسنجی می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر در این مدل‌ها معمولاً ضرایب مدل‌سازی نظیر ضریب رواناب تنها با میزان مشاهده‌شده در ایستگاه هیدرومتری واسنجی می‌شود. در اکثر این مدل‌ها رفتار سفره آب زیرزمینی به‌صورت کاملاً ابتدایی و ساده در نظر گرفته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر در این مدل‌ها سطح تراز آب زیرزمینی به‌عنوان یک متغیر در مرحله واسنجی وارد نشده و نمی‌توان تأثیر تبادلات بین دو بخش آب سطحی و زیرزمینی را به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفت. این مدل‌ها در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی آب سطحی توانایی بالایی داشته و معمولاً سفره آب زیرزمینی به‌صورت یک مخزن در نظر گرفته می‌شود. دسته دوم مدل‌های مبتنی بر شبیه‌سازی آب زیرزمینی بوده که رفتار آب سطحی را در ساده‌ترین سطح ممکن در نظر می‌گیرند. در سال‌های اخیر نیز مطالعاتی در زمینه بکارگیری مدل‌های شبیه‌سازی آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت مکمل انجام‌گرفته که برخی از این مدل‌ها به‌طور هم‌زمان در یک بسته نرم‌افزاری، معادلات آب سطحی و زیرزمینی را حل کرده‌اند. در برخی مدل‌ها نیز از دو یا چند کد مدل‌سازی برای شبیه‌سازی تبادلات آب سطحی و زیرزمینی بهره می‌گیرند. در جـدول ۱ به این مدل‌ها اشاره شده است.

در مدل‌های مذکور که قابلیت ترکیب چند کد را در قالب یک برنامه دارند، غالباً نتایج یک مدل به‌صورت غیر هم‌زمان به‌عنوان ورودی در مدل دیگر واردشده و یا بالعکس تا فرآیند تبادلات مابین دو بخش را مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار دهند. در این بین مدل SWAT-MODFLOW Prep قابلیت یکپارچه‌سازی دو مدل آب سطحی SWAT[1] و مدل آب زیرزمینی MODFLOW[2] به‌صورت برخط و هم‌زمان با روشی نقشه محور (توزیعی) و با در نظر گرفتن ویـژگی‌های مکانی پارامترهای ورودی را دارا می‌بـاشد (Bailey et al., 2016). به‌عبارت‌دیگر در مدل SWAT-MODFLOW Prep دو متغیر داده‌های مشاهده‌ای رودخانه و چاه مشاهده‌ای هم‌زمان باید واسنجی شوند. در مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی پیچیدگی‌های تبادلات آبی در حوضه (به‌عنوان مثال ترکیبی از استخراج آب زیرزمینی برای آبیاری و بهره‌گیری از آب سطحی جهت آبیاری، همچنین نشت از کانال‌ها، نشت از منابع تغذیه مصنوعی و غیره) در نظر گرفته نمی‌شد؛ اما این مدل نیز بی‌اشکال نبوده و برای حوضه‌های بزرگ‌مقیاس کاربرد ندارد.

بـه همین منظور در ایـن مقالـه از مـدل بـه‌روز شـده SWAT-MODFLOW (Bailey et al., 2016) که یک مدل هیدرولوژیکی چندمنظوره و یکپارچه است، جهت شبیه‌سازی کمی فرآیندهای آب سطحی و زیرزمینی، همچنین تبادلات بین این دو حوضه به همراه پیچیدگی‌های مربوطه، در حوضه آبریز رودخانه شراء دشت شازند واقع در جنوب غربی حوضه دریاچه نمک ایران استفاده شده است. از مزیت‌های مدل اصلاح‌شده مورداستفاده در این پژوهش می‌توان پیوند بین پمپاژ از مدل آب زیرزمینی MODFLOW، در قالب بسته چاه در کد MODFLOW با HRU[3]های در معرض آبیاری مدل SWAT و همچنین کمی‌سازی مقادیر آبیاری در دو حالت برداشت منابع آب سطحی و برداشت از منابع آب زیرزمینی اشاره نمود (Aliyari et al., 2019).

بنابراین با توجه به این نکته که شناخت شرایط هیدرولوژیکی یک حوضه آبریز بدون درک تبادلات بین منابع آب سطحی و زیرزمینی میسر نیست. از سوی دیگر استفاده از فرآیند مدل‌سازی هیدرولوژیکی سامانه‌های منابع آبی با اهداف مختلف از جمله ارزیابی پایداری سامانه و یا در بحث تخصیص منابع آب بدون در دست داشتن بیلان جامعی از سامانه منابع آبی موجود در منطقه که هر دو حوضه منابع آب سطحی و زیرزمینی را در برگیرد نمی‌تواند ابزار درستی در این زمینه باشد.



www.SID.ir

Archive of SID

**Table 1- Typical hydrological models for simulating hydrological processes**

**جدول ۱- مدل‌های هیدرولوژیکی معمول در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی**

| Type | Models | Descriptions | References |
|---|---|---|---|
| Surface water | **HBV** | Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning | (Bergström, 1992) |
| | **SAC-SMA** | The Sacramento Soil Moisture Accounting Model | (Burnash et al., 1974) |
| | **VIC** | TOPMODEL (Beven and Kirby, 1979), the Variable Infiltration Capacity | (Liang et al., 1994) |
| | **HEC-HMS** | The Hydrologic Modeling System | (William et al., 1995; US Army (Corps of Engineers, 2015 |
| | **SWAT** | The Soil and Water Assessment Tool | (Arnold et al., 1998) |
| Groundwater | **MODFLOW** | Modular Finite-Difference Flow Model | (Harbaugh, 2005) |
| | **MicroFEM** | The Microcomputer Package for Multiple-Aquifer Groundwater Flow Modeling | (Diodato, 2000) |
| | **ZOOMQ3D** | The Object-Oriented Quasi Three-Dimensional Regional Groundwater Model | (Jackson, 2001) |
| | **SVFLUX** | The Soil Vision Systems Ltd. Finite Element Seepage Analysis Program | (Thode and Fredlund, 2013) |
| | **FEHM** | The Finite Element Heat and Mass Transfer Code | (Zyvoloski et al., 2011) |
| Discrete models | **CATHY** | The Catchment Hydrology Model | (Paniconi and Wood, 1993) |
| | **inhm** | The Integrated Hydrology Model | (VanderKwaak and Loague, 2001) |
| | **HGS** | Hydrogeosphere | (Therrien et al., 2010) |
| | **PCR-GLOBWB-MOD** | The pcraster Global Water Balance Model | (Sutanudjaja et al., 2014) |
| | **parflow** | The Parallel Flow model | (Maxwell et al., 2016) |
| Integrated Models | **MIKE-SHE** | | (Refsgaard and Storm, 1995) |
| | **SWATMOD** | | (Sophocleous et al., 1999) |
| | **MODHMS** | | (HydroGeoLogic, 2006) |
| | **wasim-ETH** | The grid-based Water Flow and Balance Simulation Model | (Schulla and Jasper, 2007) |
| | **GSFLOW** | The Coupled Groundwater and Surface-Water Flow Model | (Markstrom et al., 2008) |
| | **SWAT-MODFLOW** | | Bailey et al., 2016; Guzman et al., ) (2015; Kim et al., 2008 |

تصمیم‌گیری با استفاده از این رویکرد نه‌تنها جامعیت نداشته بلکه گاهی منجر به اتخاذ تدابیر نادرست در این زمینه خواهد شد. از این‌رو وجود مدلی که بتواند هر دو بخش سطحی و زیرزمینی را پوشش دهد از اهمیت خاصی برخوردار است. از طرفی در روند هر مدل‌سازی به جهت افزایش دقت شبیه‌سازی انجام عمل واسنجی مدل ضروری است. لذا در راستای مدل‌سازی پیوسته و یکپارچه نیاز به واسنجی پیوسته و دومتغیره هر دو بخش آب سطحی و زیرزمینی احساس می‌گردد. ازآنجایی‌که کد جدید SWAT-MODFLOW به‌تازگی ارائه شده است (Aliyari, 2019)، از این‌رو بخش MODFLOW آن دارای نرم‌افزار کاربر دوست نبوده و از طرفی در مطالعات پیشین به بحث واسنجی پیوسته و هم‌زمان دو مدل پرداخته نشده و صرفاً تمرکز بر روی پیوند دو مدل به‌صورت پیوسته و برآورد تبادلات بین دو مدل بوده است. در مطالعات سابق ابتدا دو مدل به‌صورت جداگانه ساخته و به‌صورت منفرد نیز مورد واسنجی قرار می‌گرفتند، سپس با یکدیگر پیوند یافته و مدل یکپارچه برقرار می‌گردید. واضح است که واسنجی دو مدل به‌صورت منفرد و بدون درگیر کردن پارامترهای مرتبط در مدل دیگر نمی‌تواند تمامی جوانب یک مدل‌سازی پیوسته را در برگیرد. از این‌رو برای نخستین در این پژوهش واسنجی به‌صورت یکپارچه صورت گرفته بدین‌صورت که بعد از ساخت هر مدل و فرآیند یکپارچه‌سازی بین مدل‌ها، واسنجی بر روی پارامترهای مدل آب سطحی SWAT و مدل آب زیرزمینی MODFLOW به‌صورت توأمان و یکپارچه اعمال گردید. با توجه به این‌که ابزاری برای این منظور تعبیه نشده است بدین منظور جهت سهولت روند مذکور و درگیر کردن پارامترهای مدل MODFLOW در فرآیند واسنجی، پارامترهای ورودی (هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه) و خروجی پارامترهای آب زیرزمینی نظیر (تراز سطح ایستابی هر چاه، بیلان آبی و غیره) با برنامه ویژوال بیسیک در محیط اکسل برنامه‌نویسی گردید. به‌طورکلی نتایج حاصل از این مطالعه با هدف ارزیابی یک مدل



www.SID.ir

Archive of SID

هیدرولوژیکی یکپارچه، برای درک بهتر از سامانه‌های آب سطحی و زیرزمینی و روابط تعاملی حاکم بین آن‌ها می‌تواند برای تهیه یک بیلان آبی با دقت بالاتر مفید واقع گردد.

به جهت ارزیابی کاربرد مدل یکپارچه مذکور با توجه به در دست داشتن ابزار مناسب جهت بررسی و شبیه‌سازی منابع آب در هر دو حوضه سطحی و زیرزمینی، می‌توان به بررسی وضعیت سامانه منابع آبی موجود به‌صورت پیوسته پرداخت. جهت رسیدن به این هدف در این پژوهش از سناریوی مدیریتی کاهش برداشت به میزان ۱۰ درصد از منابع آب سطحی و زیرزمینی به همراه شاخص فنی آب در دسترس WAI[4] استفاده گردید.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی شازند واقع در جنوب غرب حوضه آبریز دریاچه نمک و در استان مرکزی قرار دارد. منطقه موردمطالعه بین عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی و طول‌های ۴۹ درجه و ۴ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه شرقی واقع است در شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز شازند به همراه ۳ حوضه بالادست آن نشان داده شده است. حداکثر و حداقل ارتفاع در این محدوده ۱۸۰۷ و ۳۳۶۶ می‌باشد.

متوسط بارش در این منطقه در طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۳ برابر ۳۹۰ میلی‌متر و دمای متوسط این منطقه ۱۶ درجه سلسیوس ذکر شده است. تبخیر متوسط سالانه در دشت و ارتفاعات در این محدوده مطالعاتی به ترتیب ۲۱۹۲ و ۲۱۶۱ میلی‌متر گزارش شده است. جریانات سطحی در این محدوده توسط رودخانه شراء در خروجی حوضه تخلیه می‌شوند. در این پژوهش از آمار ۳ ایستگاه هیدرومتری به همراه اطلاعات ۸ ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه استفاده گردید. در این محدوده مطالعاتی، آبخوان آبرفتی با وسعت ۲۷۳/۲ کیلومترمربع واقع گردیده است که ۶۴ درصد از گستره دشت را شامل می‌گردد. مصارف آب در این محدوده شامل ۱۹۲/۲۱ میلیون مترمکعب در سال از منابع آب زیرزمینی و حدود ۳۰ میلیون مترمکعب در سال از جریان‌های سطحی و چشمه‌ها می‌باشد. با توجه به بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی این منطقه سالانه به‌طور میانگین با ۲/۱۹ میلیون مترمکعب کسری مخزن روبه‌رو است (بی‌نام، ۱۳۹۲).

### ۲-۲- مدل SWAT

SWAT (Arnold et al., 1998) یک مدل فیزیکی، نیمه توزیعی در مقیاس حوضه و از لحاظ زمانی زمان پیوسته می‌باشد. این مدل با تأکید بر فرآیندهای سطح خاک، شیب زمین و کاربری اراضی توسعه‌یافته است. این مدل یک حوضه آبریز را با توجه به داده‌های ورودی، به چندین زیرحوضه کوچک‌تر تقسیم می‌کند که هریک از این زیر حوضه‌ها، ازنظر شیب، جنس خاک و کاربری اراضی منحصربه‌فرد هستند. هریک از این زیر حوضه‌ها به‌عنوان یک HRU شناخته می‌شوند و معادلات موجود در مدل برای هر HRU محاسبه می‌شود. ارتباط مکانی بین زیر حوضه‌ها و خروجی آن‌ها به‌طور پیوسته وجود داشته و درنهایت به خروجی حوضه اصلی ختم می‌گردد.

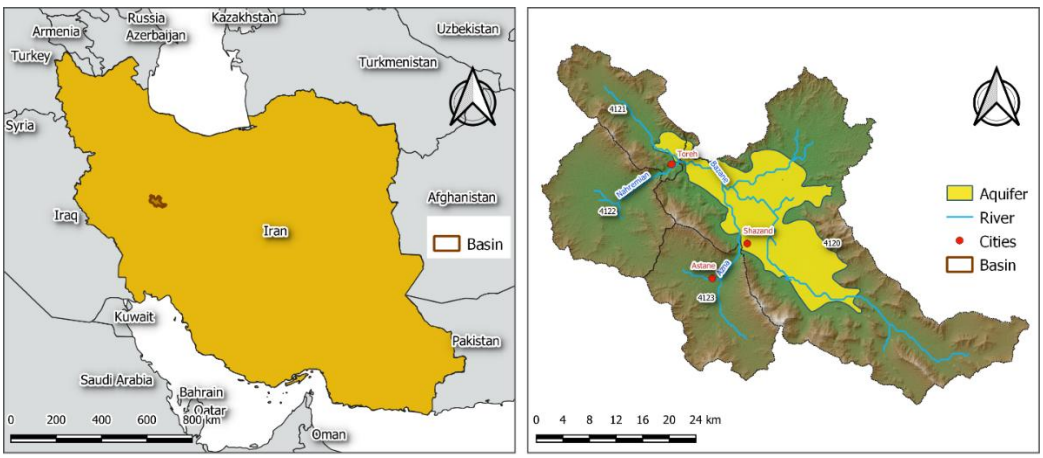


**Fig. 1- Location of study area and aquifer located in the basin to implement the integrated SWAT-MODFLOW model**

**شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و آبخوان واقع در حوضه جهت اجرای مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW**



www.SID.ir

Archive of SID

مـــدل SWAT در زمینه شبیه‌سازی تبادلات بین آبخوان و جـــریـــان سطحی بـه‌طور نمونـه تخلیه از آبخوان بـــه رودخانه و یـا نشت از رودخـانـه بـــه آبخوان دارای محدودیت است. محدودیت ذکـرشـده بـه ایـــن دلیل است که مـــدل SWAT عمق آب آبخوان کم‌عمق[5] را بـــا یک مقدار آستانه مقایسه نموده کـــه بتوانـد میزان تغذیـــه رودخـــانـــه را تخمین بـــزنـد. در ایـــن صورت مقادیـــر ارتفاعـی بستر رودخـــانـه و تـــراز آبخوان را در نظر نمی‌گیرد (Arnold et al., 1998; Jha et al., 2006; Kim et al., 2008).

### ۲-۳- روند مدل‌سازی جریان آب سطحی دشت شازند با مدل SWAT

به‌منظور مدل‌سازی آب‌های سطحی دشت شازند در این مطالعه از رابط کاربری ArcSWAT ارائه شده برای مدل SWAT استفاده شد. لایه‌های رقومی موردنیاز برای مدل‌سازی به نرم‌افزار وارد گردید. از لایه DEM با اندازه سلول ۳۰ متر اصلاح شده در ساخت شبکه آبراهه استفاده شد. لایه کاربری اراضی مربوط به سازمان GLCC و لایه خاک ۱ کیلومتری سازمان FAO در ساخت مدل به کارگرفته شد. در شکل ۲ نقشه پراکندگی کاربری اراضی منطقه در کنار نقشه DEM نمایش داده شده است.

برای داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل، مانند مقادیر بارش، دمای حداقل و حداکثر از آمار بلندمدت ۸ ایستگاه شامل ۲ ایستگاه سینوپتیک سازمان هواشناسی ایران و ۶ ایستگاه باران‌سنجی استفاده گردید و داده‌های مفقود با استفاده از پایگاه داده شبکه‌بندی شده NCEP CFSR تکمیل گردید (Eini et al., 2018). به دلیل اختلاف ارتفاع مناطق مختلف در حوضه مورد مطالعه و اعمال تأثیر ارتفاعات بر مقادیر بارش، باندهای ارتفاعی برای مدل SWAT تعیین و به مدل وارد گردید. در این مطالعه، حوضه آبریز به ۲۷ زیرحوضه تقسیم گردید که مساحت زیرحوضه‌های تشکیل‌شده بین حداقل ۱/۸۹ تا حداکثر ۱۷۷/۶ کیلومترمربع را شامل می‌شوند. هر زیرحوضه به واحدهای کوچک‌تری تحت عنوان HRU تقسیم شده که هر کدام از واحدهای ذکرشده یک ترکیب واحد از ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی و شیب منطقه به همراه خصوصیات متعلق به هر زیرحوضه را معرفی می‌کند. تعداد واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی در این مطالعه ۳۲۳ مورد می‌باشد. در شکل ۲ نقشه پراکندگی واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی در کنار نقشه پراکندگی زیرحوضه‌های ایجاد شده توسط مدل SWAT نشان داده شده است.

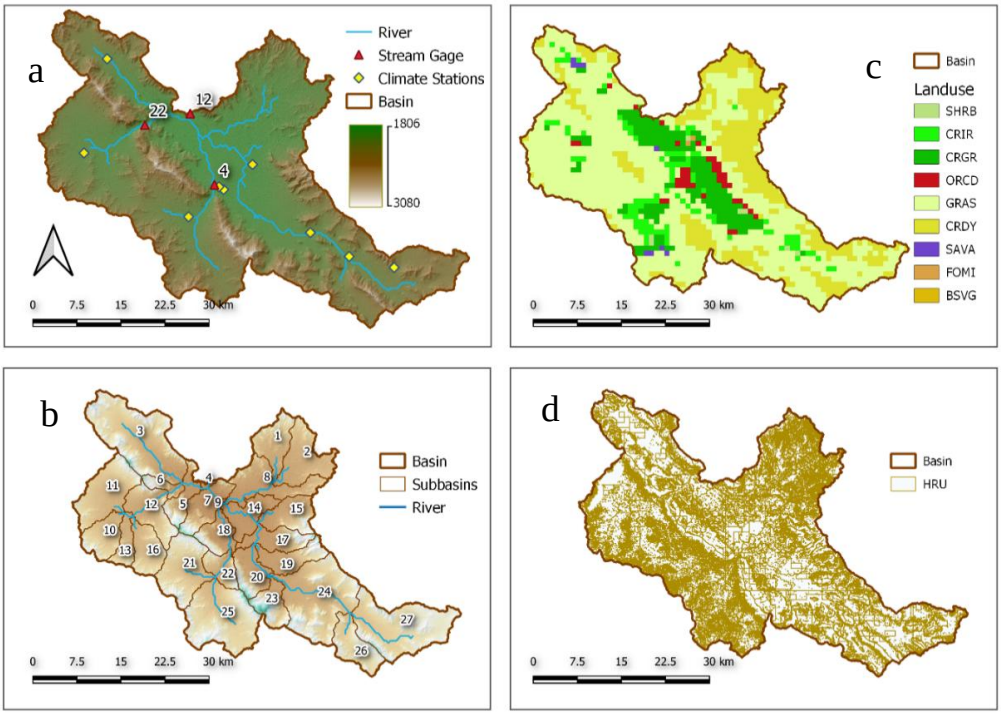


**Fig. 2- a) Position of the hydrometric stations located in the area, b) Map of the sub-basin subdivision of the SWAT model, c) Land use zoning map of the study area, d) Map of the hydrological response units created by the SWAT model**

**شکل ۲- a) موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در منطقه، b) نقشه وضعیت تقسیم‌بندی زیرحوضه‌های ایجاد شده توسط مدل SWAT، c) نقشه پهنه‌بندی کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، d) نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی ایجاد شده توسط مدل SWAT**



www.SID.ir

Archive of SID

### ۲-۴- واسنجی مدل آب سطحی

در این مطالعه از نرم‌افزار SWAT–CUP[6] و الگوریتم SUFI2 برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده گردیده است. این روش برای واسنجی مدل SWAT به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Eini et al., 2019). نرم‌افزار SWAT–CUP توسط مؤسسه تحقیقات و علوم دریایی کشور سوئیس (EAWAG) توسعه یافته است. نخستین نسخه‌ها از این نرم‌افزار در سال ۲۰۰۴ انتشار یافت. این نرم‌افزار قابلیت تلفیق کردن الگوریتم‌های Parasol، GLUE، PSO، SUFI2 و MCMC به مدل SWAT را دارد. نرم‌افزار SWAT-CUP امکان انجام فرآیندهای واسنجی، تحلیل حساسیت، صحت‌سنجی و تحلیل عدم قطعیت را برای پروژه‌ای خاص از SWAT فراهم آورده است. به‌منظور ارزیابی مدل واسنجی شده از داده‌های مشاهداتی جمع‌آوری شده در ۳ ایستگاه هیدرومتری واقع در حوضه در مقابل با مقادیر محاسباتی توسط مدل استفاده شد. آماره‌های استفاده شده جهت برآورد دقت مدل در تخمین رواناب خروجی حوضه شامل ضریب تأثیر Nash-Sutcliffe به‌عنوان تابع هدف که توسط ASCE (ASCE Task Committee, 1993) برای مدل‌سازی پیوسته هیدرولوژیکی پیشنهاد شده است استفاده گردید. بعلاوه جهت برآورد مطلوبیت عملکرد مدل از ضریب تبیین $R^2$ نیز استفاده شد (Moriasi et al., 2007).

### ۲-۵- مدل MODFLOW

MODFLOW (Harbaugh, 2005)، یک کد برای مدل‌سازی عددی و ریاضی آب زیرزمینی می‌باشد که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده توسعه یافته است. مدل یاد شده با زبان FORTRAN نوشته شده و معادلات جریان آب زیرزمینی را با استفاده از روش تفاضلات محدود حل می‌نماید. به‌عنوان یکی از نسخه‌های ارائه شده این مدل می‌توان به کد MODFLOW-NWT (Niswonger et al., 2011) اشاره کرد. کد MODFLOW قادر است فرآیندهای هیدروژئولوژیکی در حالات ماندگار و غیر ماندگار را برای آبخوان‌های مختلف شبیه‌سازی کند. در این مدل از بسته‌های NAM[7]، DIS[8]، BAS[9]، WEL[10]، GHB[11]، OBS[12]، UPW[13]، RCH[14]، RIV[15]، NWT جهت شبیه‌سازی آب زیرزمینی در کد MODFLOW استفاده شد.

### ۲-۶- روند مدل‌سازی آب زیرزمینی با کد MODFLOW

جهت مدل‌سازی و تعیین تبادلات دو حوضه آب سطحی و زیرزمینی و همچنین وضعیت هیدرولیکی آبخوان مدلی تک لایه به‌صورت کدنویسی دستی بسته‌های کد MODFLOW ساخته و با کد SWAT-MODFLOW ادغام گردید. شبکه آبخوان اعمال‌شده برای مدل شامل ۱۸۱ سطر و ۲۴۵ ستون می‌باشد که شکل ۳-a نشان‌دهنده شبکه جریان زیرزمینی می‌باشد. مدل آبخوان به‌صورت تک لایه و با توجه به بازه زمانی مدل‌سازی، در ۱۵۶ دوره تنش به‌صورت ماهانه در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ تنظیم شد.

همچنین منابع برداشتی از سفره آب زیرزمینی توسط ۷۱۱ چاه بهره‌برداری به‌صورت مستقیم از سطح آبخوان استخراج می‌شوند.

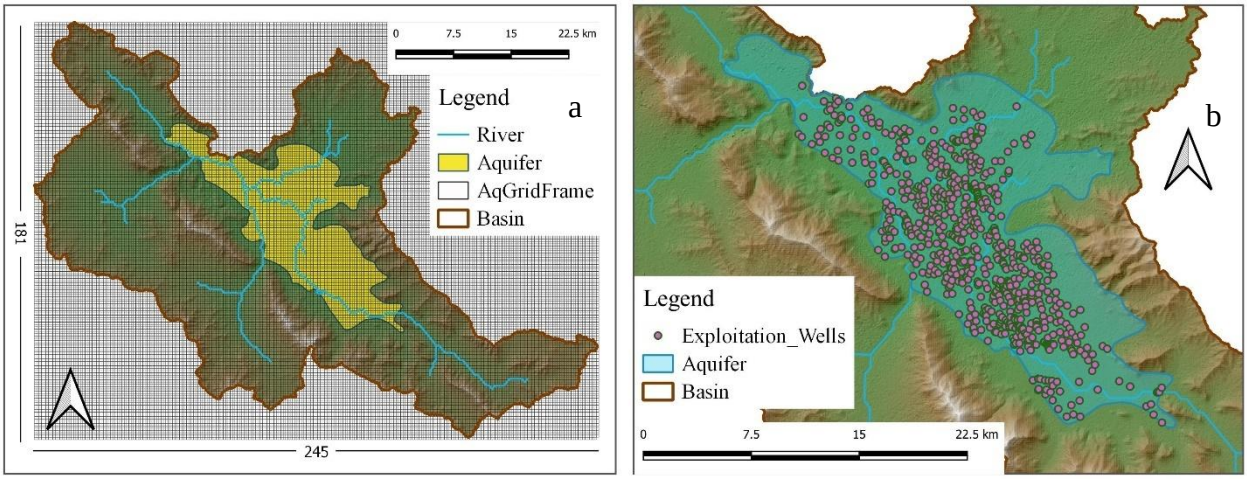


**Fig. 3- a) Indicates the distribution of wells at the aquifer level, b) Shows the aquifer position as well as the MODFLOW network model**

**شکل ۳- a) موقعیت آبخوان و همچنین شبکه مدل MODFLOW را نشان می‌دهد، b) نشان‌دهنده پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری در سطح آبخوان می‌باشد**



www.SID.ir

Archive of SID

منابع نقطه‌ای برداشت آب زیرزمینی از چاه‌های بهره‌برداری در شکل ۳-b قابل مشاهده می‌باشد. به‌منظور ارزیابی مقادیر سطح ایستابی آبخوان از مقادیر مشاهداتی هد هیدرولیکی آبخوان در ۱۹ چاه مشاهده‌ای استفاده شد. شکل ۴ پراکندگی چاه‌های مشاهده‌ای در پهنه آبخوان را نشان می‌دهد.

### ۲-۷- مدل SWAT-MODFLOW

مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW مدل‌های آب سطحی SWAT نسخه ۲۰۱۲ را با کد مدل آب زیرزمینی MODFLOW-NWT ترکیب کرده است (Bailey et al., 2016). ماژول آب زیرزمینی واقع در مدل آب سطحی SWAT با کد MODFLOW تعویض گردیده و یک برنامه یکپارچه جهت برآورد فرآیندها و تبادلات روزانه بین دو مدل را فراهم می‌سازد. اتصال بین دو مدل SWAT و MODFLOW به‌صورت نقشه محور (توزیعی) است. بدین‌صورت که پارامترهای ورودی مدل یکپارچه جهت ترکیب شدن دو مدل به‌صورت نقشه و با مختصات جغرافیایی و توزیعی به مدل وارد می‌شوند. در این اتصال متغیرهایی بر اساس واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی HRUs، شامل تغذیه از پروفیل خاک و جریانات رودخانه‌ای با سلول‌های شبکه MODFLOW مرتبط می‌شوند به این صورت که واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی نیز در طی مراحلی به واحدهای کوچک‌تری DHRUs[16] که دارای مختصات جغرافیایی هستند تبدیل می‌شوند. از طرف دیگر متغیرهای مدل آب زیرزمینی نیز از قبیل سطح ایستابی آبخوان، نرخ تبادلات بین آب‌های سطحی و زیرزمینی (زهکشی از آبخوان به رودخانه) با واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی و جریان‌های سطحی در زیر حوضه‌های مدل SWAT مرتبط می‌سازد (Aliyari et al., 2019). مقادیر تغذیه از سطح در مدل SWAT که مبتنی بر واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی می‌باشد، به بسته تغذیه در کد MODFLOW وارد می‌گردند. همچنین مقادیر تبادلات بین جریانات سطحی و رودخانه با آبخوان نیز در بسته رودخانه MODFLOW برآورد می‌گردد. با فرآیندهای مذکور مطابق شکل ۵ می‌توان ویژگی‌های مکانی و زمانی حوضه را با دقت بالایی شبیه‌سازی نمود.

مدل در ابتدا مقادیر پارامترهای ورودی مدل‌های SWAT، MODFLOW و اطلاعات موردنیاز را جهت مرتبط کردن متغیرهای زیر حوضه‌ها و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی را به سلول‌های آبخوان فراخوانی کرده و در مدل اصلاح شده قسمت جدیدی جهت معرفی منابع نقطه‌ای بهره‌برداری از آب زیرزمینی و همچنین واحدهای پاسخ

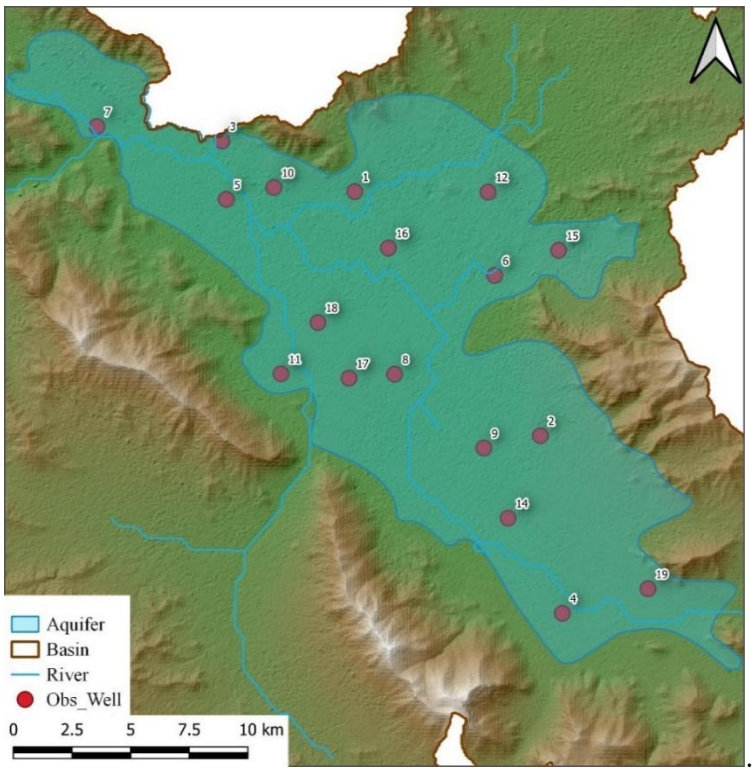


**Fig. 4- Distribution of observation wells in the aquifer located in the study area**

**شکل ۴- پراکندگی چاه‌های مشاهداتی در آبخوان واقع در محدوده مطالعاتی**



www.SID.ir

Archive of SID

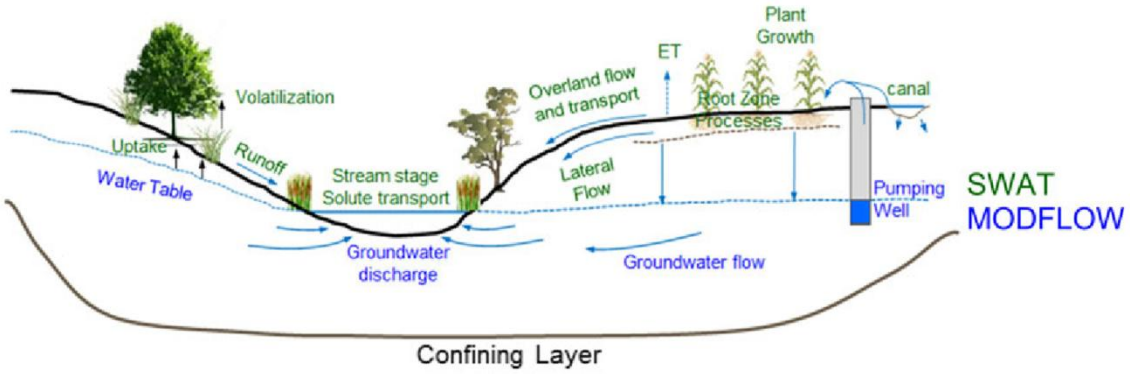


**Fig. 5- Interactions between surface water and ground water in the integrated SWAT-MODFLOW model (Bailey et al., 2017)**

**شکل ۵- تبادلات بین آب سطحی و زیرزمینی در مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW (Bailey et al., 2017)**

هیدرولوژیکی و زیر حوضه‌های در معرض آبیاری توسط این منابع تعبیه شده است تا فرآیند تبادل منابع آب پمپاژ شده زیرزمینی را به سطح زمین برقرار سازد. شکل ۶ شرح فرآیند مدل‌سازی یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل اصلاح شده SWAT-MODFLOW را نشان می‌دهد.

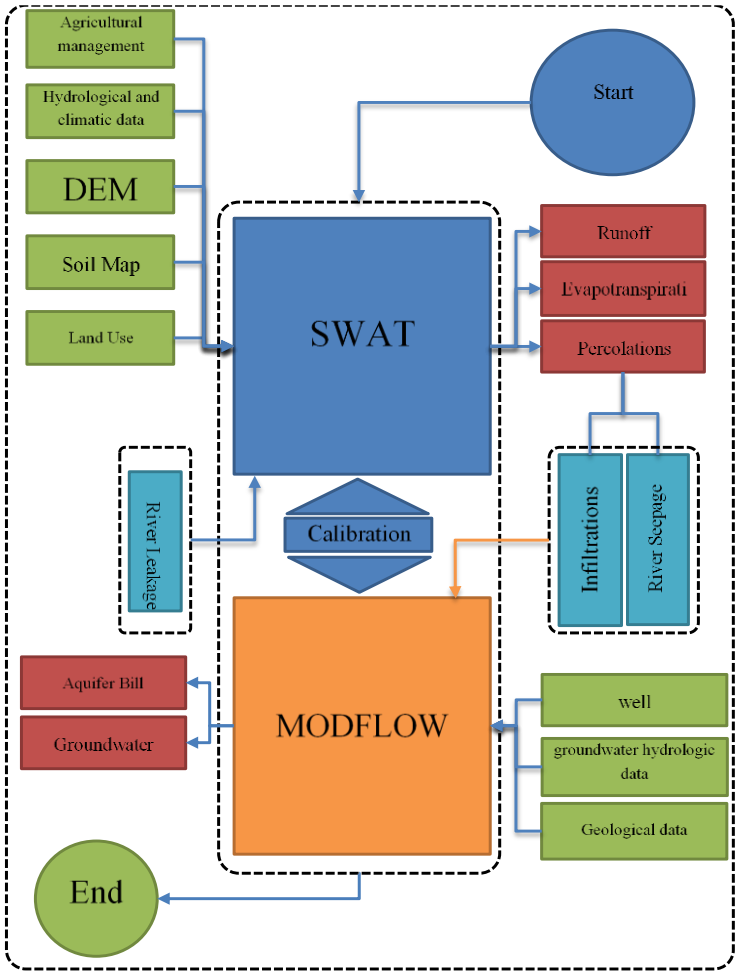


**Fig. 6- Flowchart Integrated Modeling Process in SWAT-MODFLOW Integrated Model**

**شکل ۶- فلوچارت روند مدل‌سازی تلفیقی در مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW**



www.SID.ir

Archive of SID

### ۲-۸- مدل‌سازی تلفیقی با مدل SWAT-MODFLOW

مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW در بازه ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ در محدوده مطالعاتی تنظیم شد. مقادیر هد هیدرولیکی آب زیرزمینی به‌عنوان شرایط اولیه به‌وسیله درون‌یابی تراز آب مشاهداتی در ابتدای شروع دوره‌های تنش یعنی در ابتدای سال آبی ۱۹۹۸ تخمین زده و به مدل وارد گردید. جهت سهولت کار و نبود رابط کاربری برای این منظور برای نخستین بار با استفاده از کدنویسی در محیط Visual Basic نرم‌افزار EXCEL اقدام به ساخت محیط کاربری جهت اصلاح مقادیر پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان و به عبارتی واسنجی مدل شد. با در نظر گرفتن نبود رابط کاربری جهت واسنجی پیوسته مدل SWAT-MODFLOW در صورت واسنجی دستی مدل به‌صورت سعی و خطا، در هر نوبت باید فرآیندهایی صورت گیرد تا فقط یک پارامتر تغییر و تأثیر آن بررسی شود.

جهت درک بهتر فرآیند پیوند لایه‌های مدل آب سطحی و زیرزمینی زیرحوضه شماره ۱۴ بررسی می‌گردد که در شکل ۷-a قابل مشاهده می‌باشد. شکل ۷-b نشان‌دهنده واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی واقع در این ناحیه است که در ادامه در شکل ۷-c این ناحیه به قطعات کوچک‌تری شکسته شده تا بتوان مقادیر پارامترهای خروجی و محاسباتی مدل آب سطحی و شبکه آبخوان مدل آب زیرزمینی در هم ترکیب شوند. شکل ۷-c نشان‌دهنده ادغام لایه سلول‌های شبکه MODFLOW و واحدهای هیدرولوژیکی شکسته شده DHRUs می‌باشد. شکل ۷-d نیز نشان‌دهنده سلول‌های شبکه رودخانه در زیرحوضه مذکور می‌باشد. در طی فرآیند شبیه‌سازی، میزان تبادلات بین جریان‌های سطحی و آبخوان به‌صورت تجمعی برای تمام سلول‌های شبکه آب زیرزمینی محاسبه و این مقادیر، حجم جریان زیرحوضه‌های مدل SWAT را برای پیوستن به جریانات سطحی فراهم می‌کنند. با این ترکیب رابطه مکانی بین DHRUها و سلول‌های شبکه آبخوان جهت انتقال مقادیر تغذیه محاسبه‌شده در مدل آب سطحی SWAT به مدل MODFLOW ایجاد می‌شود. همچنین میزان تراز سطح آب زیرزمینی محاسبه شده در مدل MODFLOW به مدل SWAT انتقال می‌یابد.

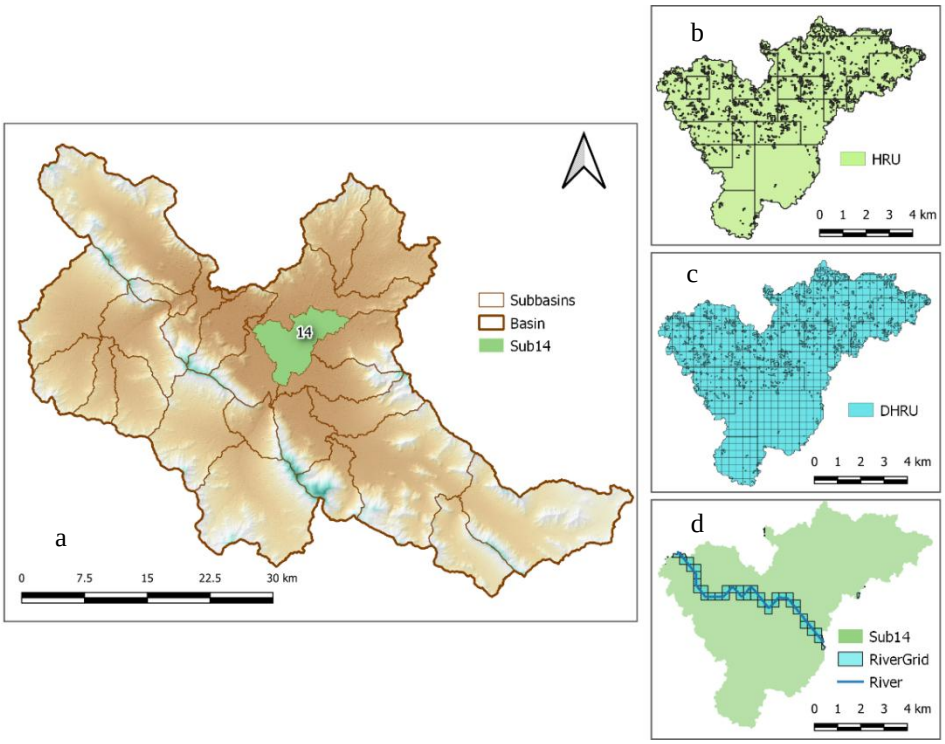


**Fig. 7- a) Subarea position 14 in the study area, b) Map of the hydrological response units output from the SWAT model, c) Discrete hydrological units with the integration of the HRU layer and the MODFLOW groundwater model network, d) Flow network cells along the river course in the subbasin 14**

**شکل ۷- a) موقعیت زیرحوضه ۱۴ در پهنه محدوده مطالعاتی، b) نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی خروجی از مدل SWAT، c) واحدهای هیدرولوژیکی گسسته با ادغام لایه HRU و شبکه مدل آب زیرزمینی MODFLOW، d) سلول‌های شبکه جریان به همراه مسیر رودخانه در زیرحوضه ۱۴**



www.SID.ir

Archive of SID

### ۲-۹- سناریوهای بهره‌برداری و مدیریتی آب سطحی و زیرزمینی

به جهت ارزیابی مدل مذکور در برآورد پایداری فنی منابع آبی موجود در حوضه لازم است یک سناریو برای بهبود وضعیت موجود در حوضه منابع آب اعم از آب‌های سطحی و زیرزمینی به‌منظور مدل‌سازی و مشخص کردن تأثیر و عملکرد این سناریوها در جهت بهبود پایداری حوضه آبریز تدوین گردد. با توجه به اینکه عمده مصارف منابع آب موجود در حوضه شازند به کشاورزی اختصاص می‌یابد. یکی از راهکارهای مناسب جهت جلوگیری از افت شدید منابع آب موجود در حوضه، کاهش درصد برداشت از منابع آب سطحی و همچنین برداشت از چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد. در این مطالعه سناریوی کاهش برداشت ۱۰ درصد از منابع آبی در نظر گرفته شده است و نتایج و اثرات آن بررسی می‌شود.

### ۲-۱۰- شاخص‌های فنی و ارزیابی پایداری

طی سالیان گذشته شاخص‌های متعددی در جهت ارزیابی منابع آب توسعه داده شده‌اند. انتخاب معیاری که ارزیابی درستی از وضعیت منابع آب را نشان دهد، می‌تواند تصمیمات سیاسی را به تصمیمات عملی نزدیک‌تر کند (Brown et al., 2011). برای مقایسه راهکارهای مختلف نیاز است که اثر سناریوهای مختلف در قالب شاخص‌هایی دیده شوند و تصمیم‌گیری بر اساس این شاخص‌ها صورت گیرد. برای رسیدن به این هدف، باوجود مطرح بودن شاخص‌های بسیاری در بحث مدیریت پایدار، صرفاً از شاخص فنی استفاده شده تا تنها مدیریت پایدار در حوضه منابع آب دیده شود.

### ۲-۱۱- شاخص آب در دسترس (WAI[17])

از این شاخص (معادله ۱) به منظور تغییرات زمانی آب در دسترس استفاده شده است. این شاخص، شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی و تفاوت آن‌ها از نظر مقادیر تقاضای همه بخش‌های شهری، صنعتی و کشاورزی است. شاخص در محدوده ۱- تا ۱ معنی‌دار است. زمانی کـــه مقدار شاخص برابر صفر باشد یعنی عرضه و تقاضا برابرند (Meigh et al., 1999):

$$WAI = \frac{(R + G - D)}{R + G - D} \qquad (۱)$$

در معادله ۱، R: رواناب سطحی؛ G: منابع آب زیرزمینی و D: جمع تقاضای همه بخش‌ها می‌باشند.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- جریانات سطحی خروجی در مدل آب سطحی SWAT

مقادیر محاسباتی و مشاهداتی جریان آب سطحی در ۳ ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی زیرحوضه‌های شماره ۴،۱۲،۲۲ در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. مقادیر آماره‌های خطا سنجی محاسبه‌شده در این ۳ ایستگاه بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل SWAT مقادیر رواناب خروجی را با توجه به مقادیر آماره‌های خطا سنجی به‌دست‌آمده در حد قابل قبولی شبیه‌سازی کرده است.

**Table 2- Surface runoff modeling results in 3 hydrometric stations**

**جدول ۲- نتایج مدل‌سازی سطحی رواناب در ۳ ایستگاه هیدرومتری**

| Stations | Sub basin | R2 | NSE |
|---|---|---|---|
| Pol_Do_ab | 4 | 0.63 | 0.60 |
| Toreh | 12 | 0.60 | 0.53 |
| Azna | 22 | 0.66 | 0.51 |

### ۳-۲- جریانات سطحی خروجی در مدل MODFLOW SWAT

پس از آن‌که دقت مدل در برآورد خروجی مدل SWAT بررسی شد. نتایج این بار در مدل SWAT-MODFLOW بررسی می‌گردد. از آنجا که تنها ایستگاه شماره ۴ بر روی آبخوان واقع در محدوده مطالعاتی واقع گردیده است از این ایستگاه جهت ارزیابی میزان دقت در برآورد رواناب خروجی حوضه آبریز استفاده شد. شکل ۹ نشان‌دهنده روند تغییر مقادیر رواناب محاسباتی در مدل SWAT-MODFLOW و مقادیر مشاهداتی در ایستگاه پل دو آب واقع در خروجی زیرحوضه ۴ می‌باشد. مقادیر آماره‌های خطاسنجی ضریب تبیین و ضریب نش- ساتکلیفت برای این ایستگاه به ترتیب برابر ۰/۶۴ و ۰/۶۲ محاسبه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فرآیند مدل‌سازی یکپارچه رواناب خروجی حوضه در حد قابل قبولی شبیه‌سازی گردیده است.

### ۳-۳- سطحی ایستابی آب زیرزمینی

برای ارزیابی عملکرد مدل یکپارچه در برآورد سطح ایستابی آبخوان، میزان هد ارتفاعی محاسباتی توسط مدل با مقادیر مشاهداتی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی مقایسه شد. به این منظور مقادیر مشاهداتی تراز آب زیرزمینی برای چاه‌های مشاهده‌ای منطقه برای بازه سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ از شرکت آب منطقه‌ای ایران اخذ گردید. شکل ۱۰ نشان‌دهنده این مقایسه بین مقادیر محاسباتی و شبیه‌سازی



www.SID.ir

Archive of SID

شده می‌باشد و هیدروگراف تراز سطح آب زیرزمینی برای چند چاه در محدوده مطالعاتی ارائه شده است. همچنین جهت ارزیابی کمی عملکرد مدل در برآورد سطح آب زیرزمینی در مقایسه با مقادیر چاه‌های مشاهداتی از پارامتر مجذور میانگین مربعات خطا RMSE و MAE استفاده گردید.

میانگین مجذوز میانگین مربعات خطا برای کل چاه‌های مشاهداتی آبخوان محدوده مطالعاتی بـــه میزان ۱/۷۲ متر در حالت ناماندگار بـــه دست آمـــد بـــا تـــوجـــه بـــه نتایج بـــه‌دست‌آمـــده در مدل SWAT-MODFLOW این مدل الگوی تراز آب زیرزمینی منطقه را در بازه اعمال شده به‌خوبی برآورد کرده است. اگرچه هنوز بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر ارائه شده مدل در برخی از نقاط حوضه آبریز تفاوتی اندک وجود دارد که از عمده دلایل آن می‌توان به دوره طولانی مدت انتخاب شده جهت اجرای مدل آب زیرزمینی، عدم تطابق زمانی در داده‌های ورودی و مورد نیاز مدل از جمله داده‌های چاه‌های مشاهداتی که به‌صورت ماهانه و شمسی می‌باشد و تبدیل تاریخ خطای قابل توجهی ایجاد می‌کند.

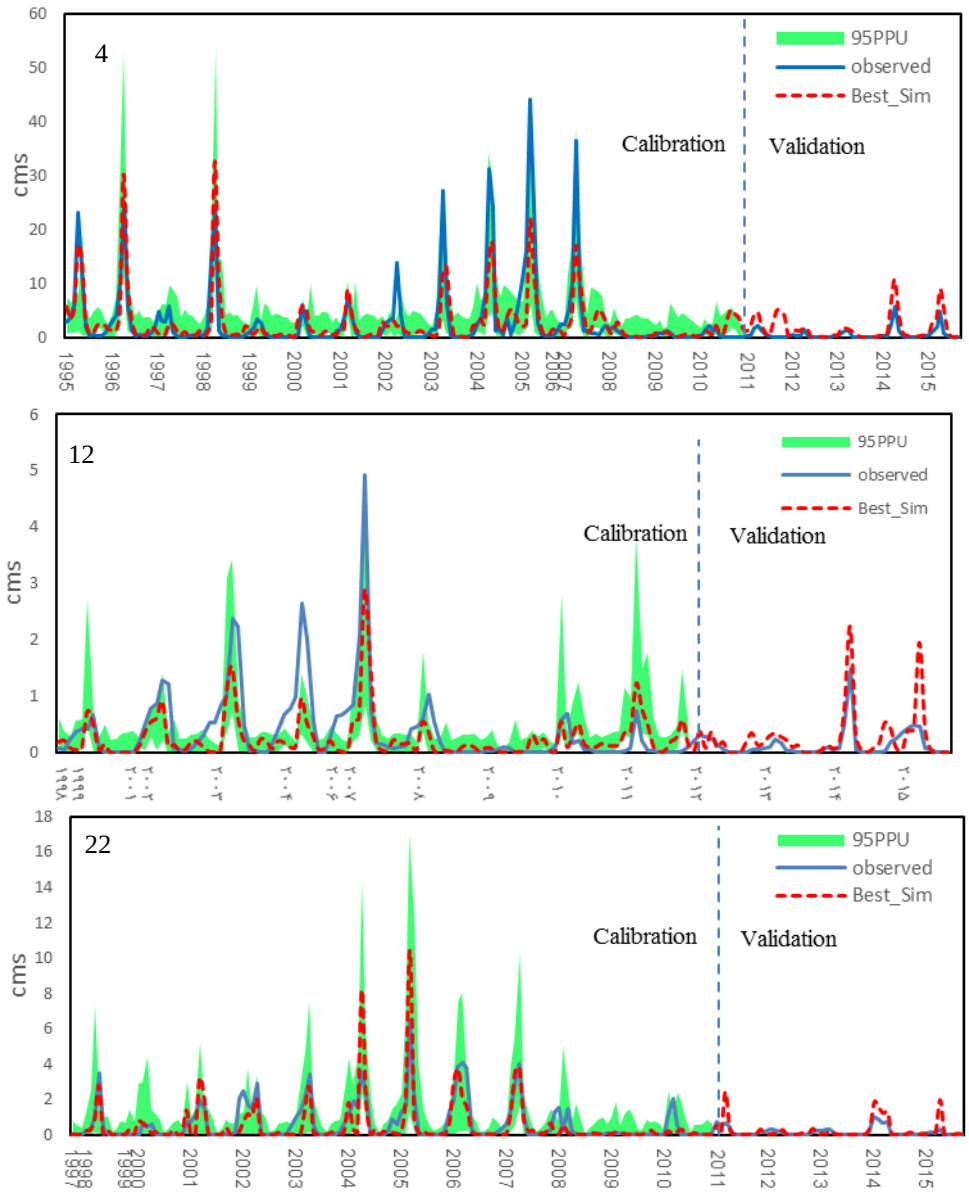


**Fig. 8- Graph of simulated values by swat model compared with observation values at 3 stations located in the study area**

**شکل ۸- نمودار مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAT در مقایسه با مقادیر مشاهداتی در ۳ ایستگاه واقع در محدوده مطالعاتی**



www.SID.ir

Archive of SID

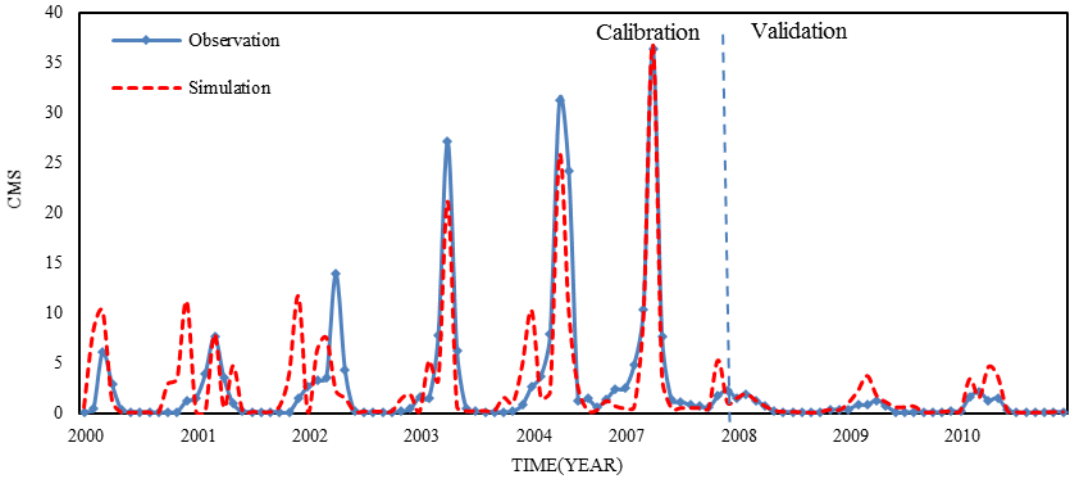


**Fig. 9- Simulated Surface Runoff Characteristics in Outlet Zone 4 after Implementation of the Integrated Model**

**شکل ۹- نمودار مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب سطحی درخروجی زیرحوضه ۴ بعد از اجرای مدل یکپارچه**

همچنین به دلیل کمبود داده در بحث برداشت از منابع آب زیرزمینی، داده‌های موجود در آماربرداری سراسری دور دوم به کل دوره مدل‌سازی تعمیم یافت. مدل آب زیرزمینی MODFLOW استفاده شده در این مطالعه به‌صورت تک لایه بوده و کل ضخامت آبخوان را در برمی‌گیرد، بنابراین از ناهمگونی عمودی آبخوان و خصوصیات مرتبط با آن (به‌عنوان مثال هدایت هیدرولیکی عمودی) صرف‌نظر شده است. با این وجود نتایج می‌تواند در حد قابل قبولی ارزیابی شود. درنتیجه بخش آب زیرزمینی هم نشان‌دهنده قابل قبول بودن عملکرد مدل در برآورد تراز سطح آب زیرزمینی می‌باشد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۱۰ در دوره واسنجی، مطابقت قابل قبولی بین تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای دیده می‌شود. پمپاژ سبب افت شدیدی در تراز آب زیرزمینی ماه‌های اسفند تا شهریورماه می‌شود. اتمام آبیاری و بارش‌های پاییزه سبب بالا آمدن سطح ایستابی می‌شوند. از این رو مدل‌سازی در شرایط غیر ماندگار به دلیل در نظر گرفتن کامل تغییرات فصلی و اثرات خشک‌سالی و ترسالی نسبت به شرایط ماندگار مناسب‌تر می‌باشد. به همین سبب همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید، برای در نظر گرفتن کامل تغییرات آب زیرزمینی دوره ۱۰ ساله برای واسنجی انتخاب گردید تا تمامی شرایط مؤثر در تغییرات آب زیرزمینی در طول این دوره‌ی طولانی در نظر گرفته شود.

### ۳-۴- کاربرد مدل در زمینه ارزیابی وضعیت سامانه منابع آبی تحت سناریو مدیریتی

جهت ارزیابی کاربرد مدل SWAT-MODFLOW در برآورد وضعیت سامانه منابع آبی با اعمال سناریوی ۱۰ درصد کاهش برداشت از منابع آب موجود در سامانه منابع آبی حوضه نتایج در دو بخش منابع آب سطحی و زیرزمینی در شکل ۱۲ ارائه گردیده است.

با توجه به شکل ۱۲ میزان سطح تراز آب زیرزمینی بعد از اعمال سناریوی کاهش برداشت نسبت به وضع موجود یک متر و ۳۰ سانتی‌متر افزایش یافته است. همچنین میزان جریان سطحی خروجی حوضه نیز پس از اعمال سناریوی مذکور ۴/۵ درصد افزایش یافته است. با توجه به میزان برداشت از منابع آب موجود در سامانه، عمده منابع مصرفی در حوضه از منابع آب زیرزمینی بوده است و نتایج حاصل شده از اعمال سناریوی مدیریتی بر روی سامانه منابع آبی موجود در حوضه نیز نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است میزان تغییرات در اثر اعمال سناریوی مدیریتی در بخش آب سطحی به نسبت آب زیرزمینی کمتر برآورد گردیده است.

با استفاده از مدل مذکور و با اعمال سناریوی ۱۰ درصد کاهش برداشت از منابع آبی موجود در سامانه آبی، شاخص WAI به میزان ۰/۳۲ برآورد گردید. همچنین این میزان برای وضع موجود برابر با ۰/۲۹ برآورد گردید که با توجه به ماهیت این شاخص فنی، افزایش نرخ این شاخص، بهبود در وضعیت سامانه منابع آبی را نشان می‌دهد. همچنین کاربرد مدل نیز با اعمال سناریوی کاهش برداشت از منابع آبی به میزان ۱۰ درصد نیز مورد بررسی قرار گرفت که اعمال این سناریو با توجه به نتایج حاصله، بهبود در وضعیت سامانه منابع آبی حوضه را به همراه داشت. درنتیجه از مدل یاد شده می‌توان جهت اتخاذ تدابیر مدیریتی در سطح حوضه آبریز به دلیل جامع بودن مدل یاد شده در هر دو حوضه سطحی و زیرزمینی استفاده کرد.



www.SID.ir

Archive of SID

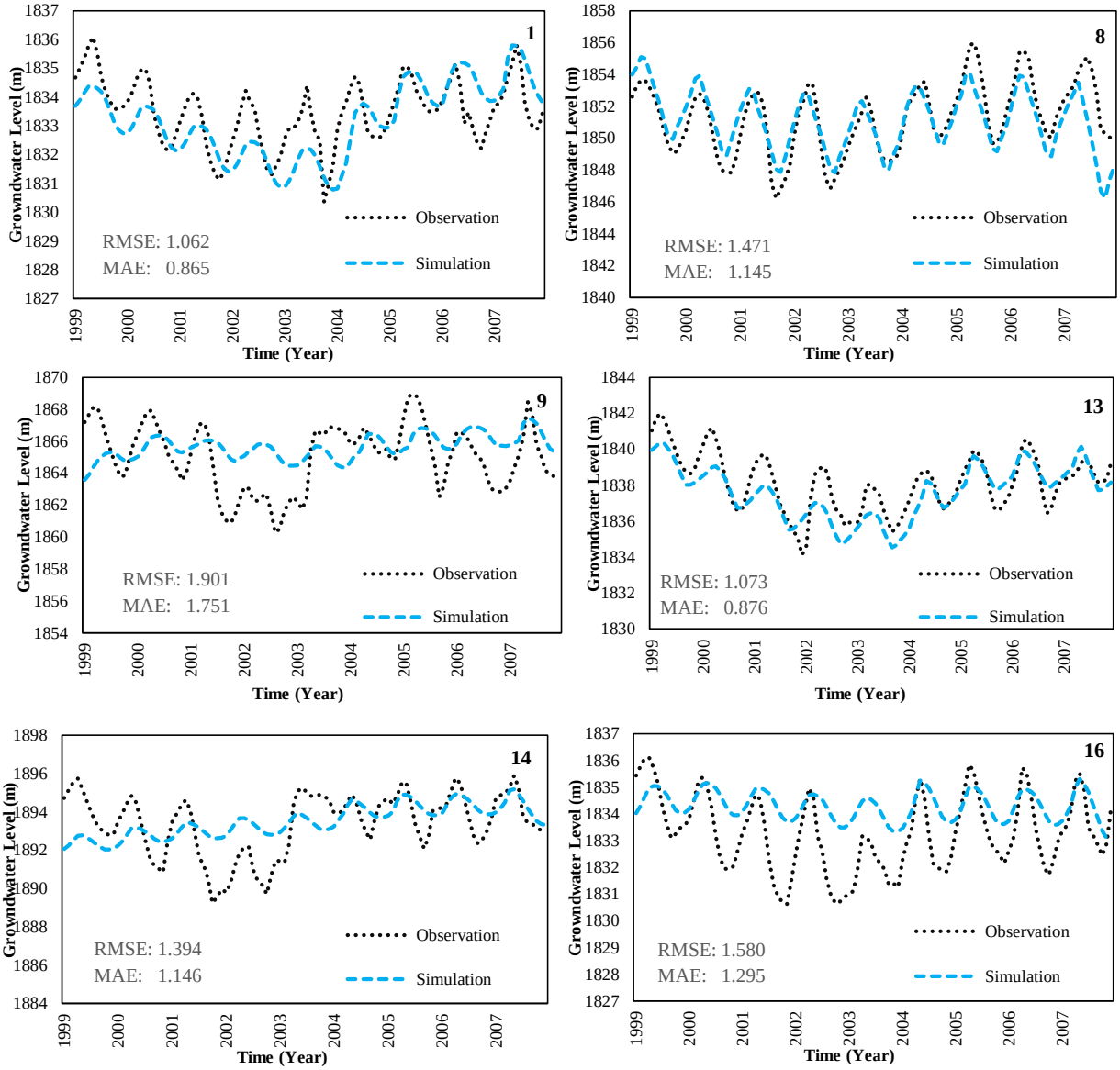


**Fig. 10- Indicates the comparison between the time series of the level of observation and computational levels of several wells by the SWAT-MODFLOW model during the calibration period**

**شکل ۱۰- نشان‌دهنده مقایسه بین سری زمانی سطح تراز مشاهداتی و محاسباتی چند چاه توسط مدل SWAT-MODFLOW در دوره واسنجی می‌باشد**



www.SID.ir

Archive of SID

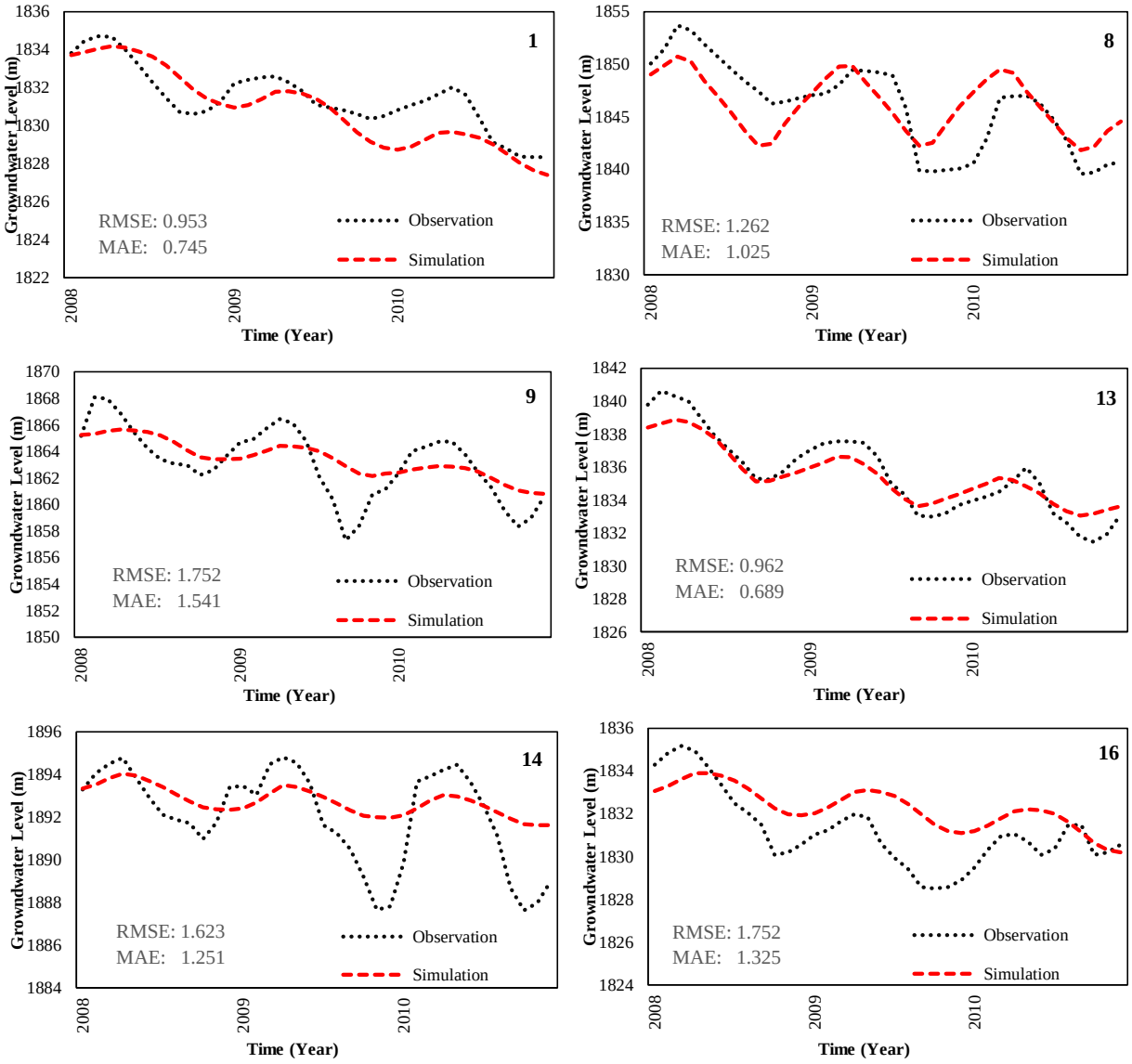


**Fig. 11- Represents a comparison between the time series of the level of observation and computational levels of several wells by the SWAT-MODFLOW model during the verification period**

**شکل ۱۱- نشان‌دهنده مقایسه بین سری زمانی سطح تراز مشاهداتی و محاسباتی چند چاه توسط مدل SWAT-MODFLOW در دوره صحت‌سنجی می‌باشد**



www.SID.ir

Archive of SID

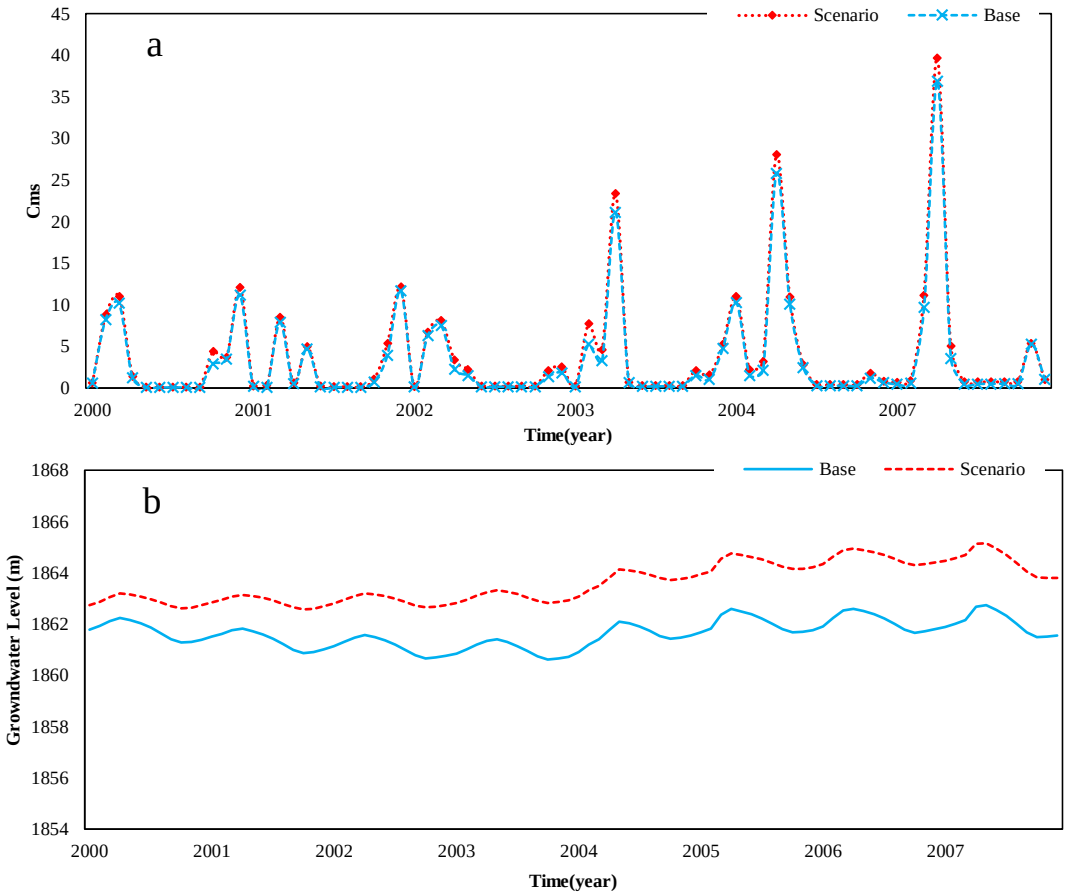


**Fig. 12- a) Shows the comparison between surface water levels before and after the scenario b) indicates the level of groundwater level before and after the scenario**

**شکل ۱۲- a) نشان‌دهنده مقایسه بین مقادیر جریان آب سطحی قبل و بعد از اعمال سناریو، b) نشان‌دهنده تراز سطح آب زیرزمینی قبل و بعد از اعمال سناریو**

## ۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

با توجه به پیوستگی منابع آبی در هر سامانه هیدرولوژیکی و اهمیت هر دو حوضه در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در سطح حوضه آبریز استفاده از مدلی که هر دو جنبه را در نظر می‌گیرد بسیار حائز اهمیت است. در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی سامانه هیدرولوژیکی حوضه آبریز، از مدل یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی SWAT-MODFLOW استفاده گردید که هر دو حوضه آب‌های سطحی و زیرزمینی را در منابع آب سطحی و زیرزمینی مورد بررسی قرار داده و با دید جامع‌تری نسبت به بهبود شرایط حوضه آبخیز اقدام شود.

مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW اصلاح شده برای بازه زمانی بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ بر روی حوضه رودخانه شراء واقع در محدوده مطالعاتی شازند در جنوب غرب حوضه دریاچه نمک اجرا شد و با مقایسه بین مقادیر جریان خروجی حوضه و تراز سطحی ایستابی ایستگاه‌ها و چاه‌های مشاهداتی با پراکندگی مناسب در سطح حوضه آبریز و مقادیر محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این پژوهش مدل SWAT به‌صورت منفرد تنظیم و اجرا گردید در بازه ۲۱ ساله اجرا گردید. نتایج ضرایب تبیین و نش- ساتکلیفت به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۶ حاصل شد. میزان دقت برآورد جریان سطحی در فرآیند شبیه‌سازی در رنج قابل قبولی قرار گرفت. استفاده از مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW به رقم بکار گیری آن در بازه کوتاه‌مدت و با در نظرگیری فعل و انفعالات بین آب‌های سطحی و زیرزمینی نتایج بهتری نسبت به مدل SWAT از خود نشان داد. نتایج ضرایب تبیین و نش- ساتکلیفت در حوضه آب‌های سطحی در ایستگاه پل دو آب در خروجی حوضه به ترتیب برابر با ۰/۶۴ و ۰/۶۳ حاصل شد که بهبود در دقت مدل‌سازی را در این حوضه را نشان می‌دهد. در زمینه منابع آب زیرزمینی نیز میزان شاخص‌های RMSE و MAE در



www.SID.ir

Archive of SID

طول دوره مدل‌سازی به ترتیب برابر با ۱/۷۲ و ۱/۴۵ متر محاسبه گردید که در حد قابل قبولی می‌باشد. بیلان ارائه شده توسط مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر و دقیق‌تر از منابع آب زیرزمینی حاوی نتایج کامل‌تری بود. همچنین بیلان کلی منابع آب به‌صورت پیوسته در این مدل ارائه می‌شود که به‌منظور اتخاذ تصمیمات مدیریتی در حوضه آبریز بسیار راه گشا خواهد بود. به‌طوری‌که با بکارگیری سناریوی مدیریتی کاهش برداشت از منابع آب در کنار استفاده از شاخص WAI به‌منظور ارزیابی وضعیت سامانه منابع آبی موجود در حوضه، نتایج حاصله با افزایش میزان شاخص مذکور به میزان ۰/۰۳، بیان‌گر بهبود وضعیت سامانه منابع آبی بود.

## پی‌نوشت‌ها

1- Soil and Water Assessment Tools
2- Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model
3- Hydrological Response Unit
4- Water Avability Index
5- Shallow Groundwater
6- SWAT Calibration and Uncertainty Procedures
7- Name File Pakage
8- Discretization Pakage
9- Basis Pakage
10- Well Pakage
11- General-Head Boundary Package
12- Observation Package
13- Upstream Weighting Package
14- Recharge Pakage
15- River Pakage
16- Disaggregated Hydrological Response Unit
17- Water Availability Index

## ۵- مراجع


Aliyari F, Bailey RT, 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 115:200-210

Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, and Williams JR (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. Journal of the American Water Resources Association 34(1):73-89

Arnold JG, Williams JR, and Maidment DR (1995) Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. Journal of Hydraulic Engineering 121(2):171-183

ASCE Task Committee (1993) Criteria for evaluation of watershed models. Journal of Irrigation and Drainage Engineering

Bailey R, Rathjens H, Bieger K, Chaubey I, and Arnold J (2017) SWATMOD-Prep: Graphical user interface for preparing coupled SWAT-MODFLOW simulations. Journal of the American Water Resources Association

Bailey RT, Wible TC, Arabi M, Records RM, and Ditty J (2016) Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. Hydrological Processes 30(23):4420–4433

Bergström S (1992) The HBV model - its structure and applications. Swedish Meteorological and Hydrological Institute Reports Hydrology

Burnash R, Ferral R, and McGuire R (1974) A generalized streamflow simulation system - conceptual modeling for digital computers. Mathematical Models in Hydrology

Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, and Veith T L (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE 50(3):885-900

Diodato DM (2000) Software spotlight. Ground Water, John Wiley & Sons, Ltd (10.1111) 38(5):649-650

Eini M, Javadi S, Delavar M (2019) Development of comprehensive karstic watershed model in order to make estimates and precision for the components of the water balance. Iran-Water Resources Research (In Persian) 145:125-136

Eini M, Javadi S, Delavar M (2018) Evaluating the performance of CRU and NCEP CFSR global reanalysis climate datasets in hydrological simulation by SWAT model (Case study: Maharlu Basin). Iran-Water Resources Research (In Persian) 141:32-44

Fleckenstein JH, Krause S, Hannah DM, and Boano F (2010) Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. Advances in Water Resources 33(11):1291–1295

Guzman JA, Moriasi DN, Gowda PH, Steiner JL, Starks PJ, Arnold JG, and Srinivasan R (2015) A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. Environmental Modelling and Software, Elsevier Ltd 73:103-116

Harbaugh A W (2005) MODFLOW-2005, The U . S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 253




www.SID.ir

Archive of SID

Refsgaard J C, Storm B, and Singh V P (1995) MIKESHE, Computer Models of Watershed Hydrology.Water Resources Publications, Colorado, USA.Water Resources Publications, 806-846

Schulla J and Jasper K (2007) Model description WASIM-ETH (Water balance simulation model ETH). Institute for Atmospheric and Climate Science, Zürich, 181

Sophocleous M (2002) Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. Hydrogeology Journal 10(1):52-67

Sophocleous MA, Koelliker JK, Govindaraju RS, Birdie T, Ramireddygari SR, and Perkins SP (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

Sutanudjaja EH, Van Beek LPH, De Jong SM, an Geer FC, and Bierkens MFP (2014) Calibrating a large-extent high-resolution coupled groundwater-land surface model using soil moisture and discharge data. Water Resources Research 50(1):687-705

Therrien R, McLaren RG, Sudicky EA, and Panday SM (2010) HydroGeoSphere, A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. Groundwater Simulations Group

Thode R and Fredlund M (2013) 2D/3D Seepage Modeling Software (SVFLUX) Tutorial Manual. SoilVision Systems Ltd., Saskatoon, Saskatchewan, Canada

United Nations (2014) World population ageing. Department of Economic & Social Affairs Population Division

US Army Corps of Engineers (2015) HEC-HMS hydrologic modeling system. User's Manual - Version 4.1 - CPD-74A

VanderKwaak JE and Loague K (2001) Hydrologic-response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model. Water Resources Research 37(4):999-1014

Zyvoloski G A, Robinson B A, Dash Z V, Kelkar S, Viswanathan H S, Pawar R J, ... and Chu S (2011) Software Users Manual (UM) for the FEHM Application Version 3.1-3. X. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos

HydroGeoLogic I (2006) MODHMS: A comprehensive MODFLOW-based hydrologic modeling system, Ver. 3.0, Documentation and Users Guide. Available at: https://scholar.google.com/scholar_lookup? title =MODHMS%3A A Comprehensive MODFLOW-Based Hydrologic Modeling System%2C Ver. 3.0%2C Documentation and Users Guide& author=HydroGeoLogic%2C Inc (HGL) & publication_year=2006

Jackson C R (2001) The development and validation of the object-oriented quasi three-dimensional regional groundwater flow model ZOOMQ3D., 57. British Geological Survey, 57pp

Jha MK, Gassman PW, and Arnold JG (2006) Water quality modeling for the raccoon river watershed using SWAT. Transactions of the ASABE 50(2):479-493

Kim NW, Chung IM, Won YS, and Arnold JG (2008) Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. Journal of Hydrology, DOI:10.1016/j.jhydrol.2008.02.024

Liang X, Lettenmaier DP, Wood EF, and Burges SJ (1994) A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. Journal of Geophysical Research 99(D7)

Markstrom SL, Niswonger RG, Regan RS, Prudic DE, and Barlow PM (2008) 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). Geological Survey (US)

Maxwell R M, Kollet S J, Smith S G, Woodward C S, Falgout R D, Ferguson I M,... Ashby S (2016) ParFlow user's manual. Integrated Groundwater Modeling Center Report GWMI 2016-01

Meigh J R, McKenzie A A, Sene K J (1999) A grid-based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa. Water Resources Management 13(2):85-115

Niswonger R G, Panday S, Ibaraki M (2011) MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005. Ground Water- Modeling Techniques

Paniconi C and Wood EF (1993) A detailed model for simulation of catchment scale subsurface hydrologic processes. Water Resources Research 29(6):1601-1620



www.SID.ir