



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

S. Naeb¹, S. Javadi^{2*}, and M.E. Banihabib³

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-Sutcliffe 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

کاربرد مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW جهت مدل سازی همزمان آب های سطحی و زیرزمینی در راستای بهبود وضعیت سامانه منابع آبی در مقیاس حوضه ای

سجاد نائب فاروجی^۱، سامان جوادی^{۲*} و محمدابراهیم بنی حبیب^۳

چکیده

به منظور مدیریت پایدار آب در حوضه آبریز درک کامل از شرایط هیدرولوژیکی و تبادلات آب های 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 شبیه سازی کمی فرآیندهای آب سطحی و زیرزمینی و تبادلات همزمان بین این دو سیستم در سطح حوضه آبریز شازند، استفاده شده است. با یکپارچگی مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW بر روی حوضه مورد مطالعه، کلیه بسته های مرتبط با کد MODFLOW برای آبخوان تک لایه شازند به صورت 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 شراه و خروجی حوضه، مقدار ضریب R^2 و نش- ساتکلایف به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۶۳ را نشان می دهد. در بخش آب زیرزمینی میزان RMSE برای ۱۹ چاه مشاهده ای 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 مشاهده ای و ایستگاه هیدرومتری) دارای دقت بالاتری می باشد. با توجه نتایج حاصل شده در دو بخش آب سطحی و زیرزمینی عملکرد مدل با توجه به یکپارچگی و در نظر گرفتن تمامی تبادلات دو مدل به صورت همزمان و در یک منطقه وسیع قابل قبول 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 به دست آمده از شاخص آب در دسترس WAI، استفاده شده در این مطالعه، بیان گر بهبود در مقدار شاخص مذکور و در نتیجه بهبود وضعیت سامانه منابع آبی در مقیاسه 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

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

۱- دانش آموخته 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.

در مدل‌های مذکور که قابلیت ترکیب چند کد را در قالب یک برنامه دارند، غالباً نتایج یک مدل به صورت غیر هم‌زمان به عنوان ورودی در مدل دیگر وارد شده 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 SWAT¹ و مدل آب زیرزمینی MODFLOW² به صورت برخط و هم‌زمان با روشی نقشه محور (توزیعی) و با در نظر گرفتن ویژگی‌های مکانی پارامترهای ورودی را دارا می‌باشد (Bailey et al., 2016). به عبارت دیگر 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 (به عنوان 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 بزرگ مقیاس کاربرد ندارد.

به همین منظور در این مقاله از مدل به روز شده 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 شرا دشت شازند واقع در جنوب غربی حوضه دریاچه نمک ایران استفاده شده است. از مزیت‌های مدل اصلاح شده مورد استفاده در این پژوهش می‌توان پیوند بین پمپاژ از مدل آب زیرزمینی MODFLOW، در قالب بسته چاه در کد MODFLOW با HRU³‌های 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.

به منظور مدیریت پایدار آب در حوضه یک آبریز وسیع، درک کامل از شرایط هیدرولوژیکی، تبادلات آب‌های سطحی و زیرزمینی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از اهمیت خاصی برخوردار است (Fleckenstein et al., 2010). این در حالی است که بخش قابل توجهی 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 از لحاظ 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 مؤثر یک حوضه آبریز ضروری می‌باشد (Sophocleous, 2002). به عبارت دیگر مدیریت یکپارچه یک سیستم پیچیده منابع آبی بزرگ مقیاس 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 قابل دسترس تحت شرایط کنونی و شرایط آتی و نیز تعیین سیاست‌های مدیریت یکپارچه منابع آب را داشته باشد.

به طور کلی 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. به عبارت دیگر در این مدل‌ها معمولاً ضرایب مدل‌سازی نظیر ضریب رواناب تنها با میزان مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری واسنجی می‌شود. در اکثر این مدل‌ها رفتار سفره آب زیرزمینی به صورت کاملاً ابتدایی و ساده در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر در این مدل‌ها سطح تراز آب زیرزمینی به عنوان یک متغیر در مرحله واسنجی وارد نشده و نمی‌توان تأثیر تبادلات بین دو بخش آب سطحی و زیرزمینی را به صورت هم‌زمان در نظر گرفت. این مدل‌ها در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی آب سطحی توانایی بالایی داشته و معمولاً سفره آب زیرزمینی به صورت 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 به صورت مکمل انجام گرفته که برخی از این مدل‌ها به طور 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 جدول

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)

پیوند یافته و مدل یکپارچه برقرار می‌گردد. واضح است که واسنجی دو مدل به صورت منفرد و بدون درگیر کردن پارامترهای مرتبط در مدل دیگر نمی‌تواند تمامی جوانب یک مدل‌سازی پیوسته را در برگیرد. از این رو برای نخستین در این پژوهش واسنجی به صورت یکپارچه صورت گرفته بدین صورت که بعد از ساخت هر مدل و فرآیند یکپارچه‌سازی بین مدل‌ها، واسنجی بر روی پارامترهای مدل آب سطحی SWAT و مدل آب زیرزمینی MODFLOW به صورت توأمان و یکپارچه اعمال گردید. با توجه به این که 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. به‌طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه با هدف ارزیابی یک مدل

تصمیم‌گیری با استفاده از این رویکرد نه تنها جامعیت نداشته بلکه گاهی منجر به اتخاذ تدابیر نادرست در این زمینه خواهد شد. از این رو 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. از آنجایی که کد جدید SWAT-MODFLOW به‌تازگی ارائه شده است (Aliyari, 2019)، از این رو 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 به صورت پیوسته و برآورد تبادلات بین دو مدل بوده است. در مطالعات سابق ابتدا دو مدل به صورت جداگانه ساخته و به صورت منفرد نیز مورد واسنجی قرار می‌گرفتند، سپس با یکدیگر

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 شرا 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 توسعه یافته است. این مدل یک حوضه آبریز را با توجه به داده‌های ورودی، به چندین زیرحوضه کوچک‌تر تقسیم می‌کند که هر یک از این زیر حوضه‌ها، از نظر شیب، جنس خاک و کاربری اراضی منحصر به فرد هستند. هر یک 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 در نهایت به خروجی حوضه اصلی ختم می‌گردد.

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 به صورت 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 WAI⁴ استفاده گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی سازند واقع در جنوب غرب حوضه آبریز دریاچه نمک و در استان مرکزی قرار دارد. منطقه مورد مطالعه 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 سازند 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

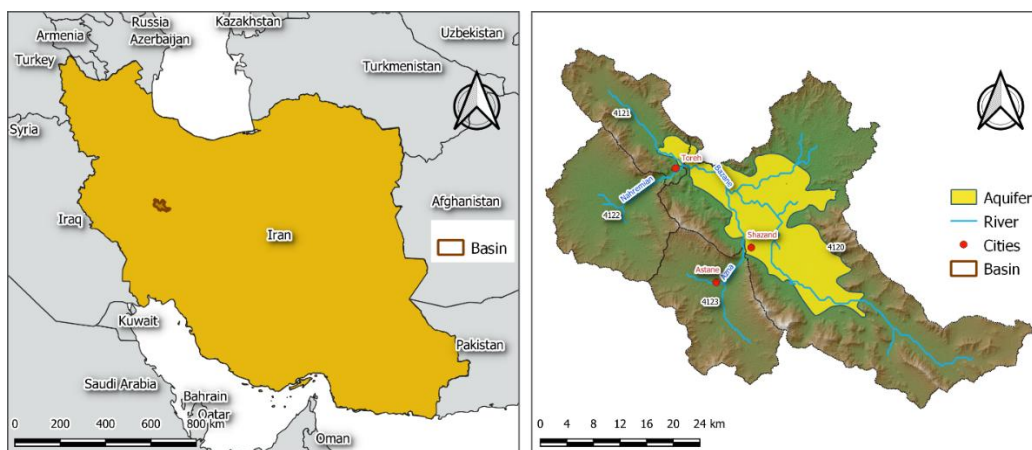


Fig. 1- Location of study area and aquifer located in the basin to implement the integrated SWAT-MODFLOW model

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

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 تشکیل شده 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 ذکر شده 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 پراکنندگی واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی در کنار نقشه پراکنندگی زیرحوضه‌های ایجاد شده توسط مدل SWAT نشان داده شده است.

مدل SWAT در زمینه شبیه‌سازی تبادلات بین آبخوان و جریان سطحی به‌طور نمونه تخلیه از آبخوان به رودخانه و یا نشت از رودخانه به آبخوان دارای محدودیت است. محدودیت ذکر شده به این دلیل است که مدل SWAT عمق آب آبخوان کم‌عمق^۵ را با یک مقدار آستانه مقایسه نموده که بتواند میزان تغذیه رودخانه را تخمین بزند. در این صورت مقادیر ارتفاعی بستر رودخانه و تراز آبخوان را در نظر نمی‌گیرد (Arnold et al., 1998; Jha et al., 2006; Kim et al., 2008).

۳-۲- 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 مورد نیاز 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 پراکنندگی کاربری اراضی منطقه در کنار نقشه DEM نمایش داده شده است.

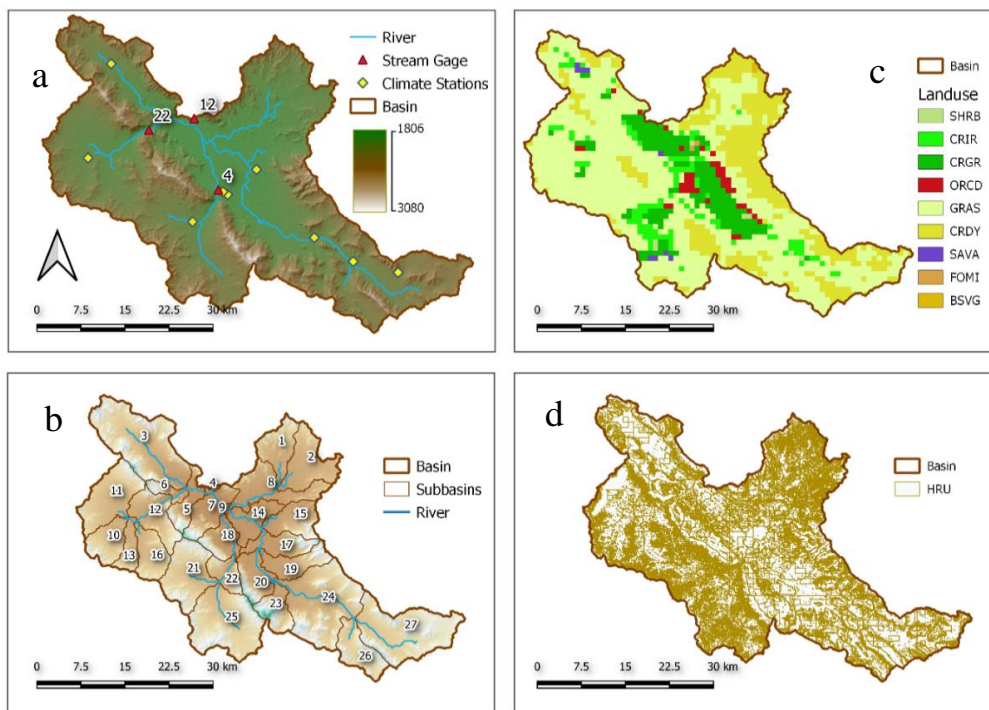


Fig. 2- a) Position of the hydrometric stations located in the area, b) Map of the sub-basin subdivision of the SWAT model, c) Land use zoning map of the study area, d) Map of the hydrological response units created by the SWAT model

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

۴-۲- واسنجی مدل آب سطحی

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 NAM⁷، DIS⁸، BAS⁹، WEL¹⁰، GHB¹¹، OBS¹²، UPW¹³، RCH¹⁴، RIV¹⁵، NWT جهت شبیه‌سازی آب زیرزمینی در کد MODFLOW استفاده شد.

۶-۲- 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 کد نویسی دستی بسته‌های کد MODFLOW ساخته و با کد SWAT-MODFLOW ادغام گردید. شبکه آبخوان اعمال شده برای مدل شامل ۱۸۱ سطر و ۲۴۵ ستون می‌باشد که شکل ۳-۳ 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.

در این مطالعه از نرم‌افزار SWAT-CUP⁶ 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 PSO، GLUE، ParasoI، 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 هیدروژئولوژیکی پیشنهاد شده است استفاده گردید. بعلاوه جهت برآورد مطلوبیت عملکرد مدل از ضریب تبیین R² نیز استفاده شد (Moriasi et al., 2007).

۵-۲- مدل MODFLOW

MODFLOW (Harbaugh, 2005)، یک کد برای مدل‌سازی

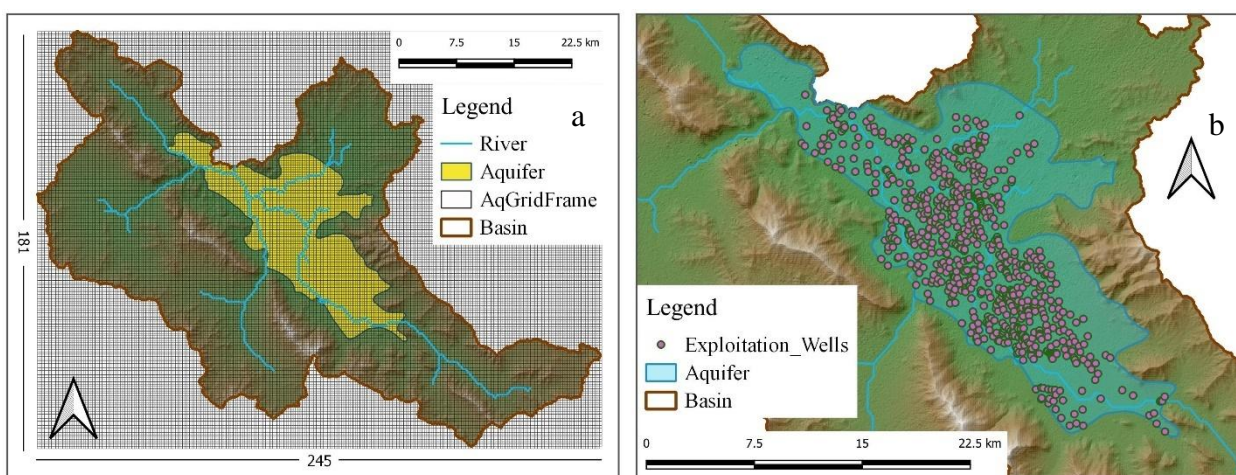


Fig. 3- a) Indicates the distribution of wells at the aquifer level, b) Shows the aquifer position as well as the MODFLOW network model

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

منابع نقطه‌ای برداشت آب زیرزمینی از چاه‌های بهره‌برداری در شکل ۳-۲ قابل مشاهده می‌باشد. به منظور 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.

۷-۲- 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 به صورت نقشه محور (توزیعی) است. بدین صورت که پارامترهای ورودی مدل یکپارچه جهت ترکیب شدن دو مدل به صورت نقشه و با مختصات جغرافیایی و توزیعی به مدل وارد می‌شوند. در این اتصال متغیرهایی بر اساس واحدهای پاسخ هیدرولژیکی HRUs، شامل تغذیه از پروفیل خاک و جریانات رودخانه‌ای با سلول‌های شبکه

مدل در ابتدا مقادیر پارامترهای ورودی مدل‌های SWAT، MODFLOW و اطلاعات موردنیاز را جهت مرتبط کردن متغیرهای زیر حوضه‌ها و واحدهای پاسخ هیدرولژیکی 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

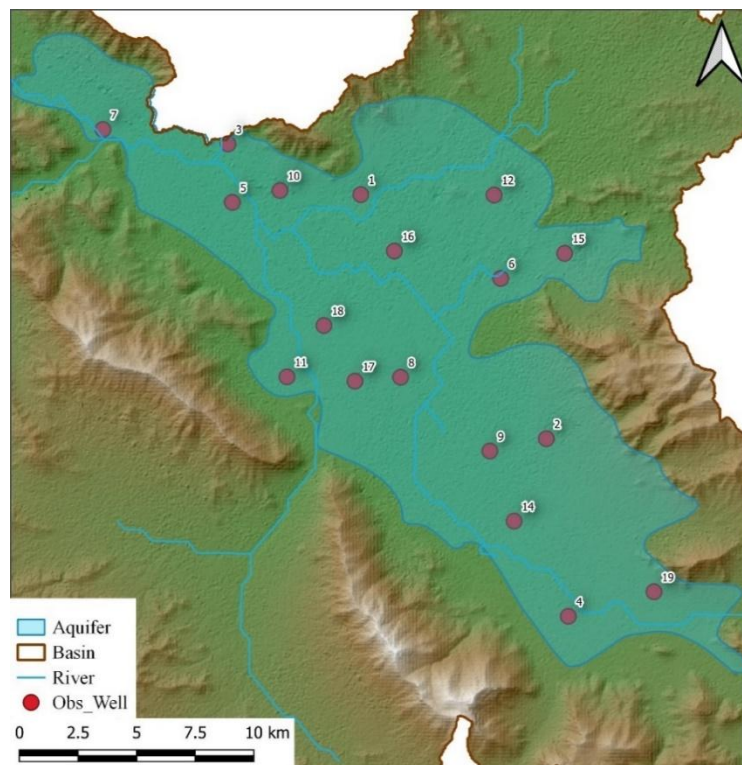


Fig. 4- Distribution of observation wells in the aquifer located in the study area
شکل ۴- پراکندگی چاه‌های مشاهداتی در آبخوان واقع در محدوده مطالعاتی

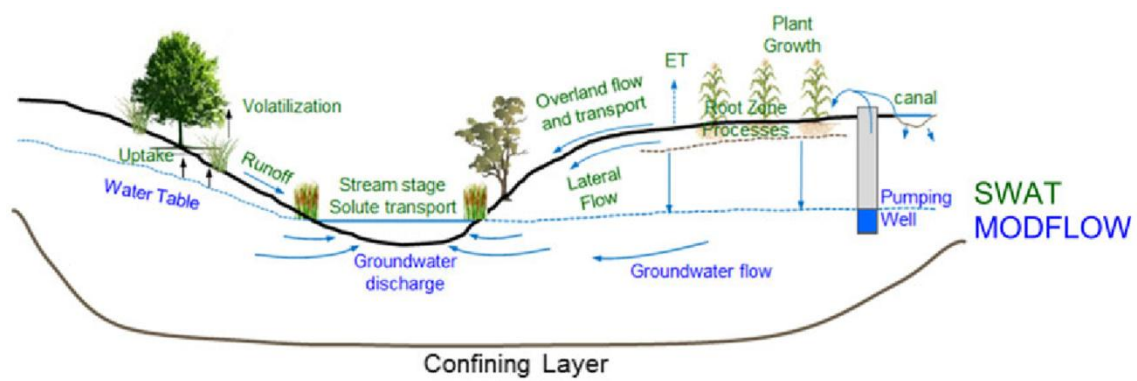


Fig. 5- Interactions between surface water and ground water in the integrated SWAT-MODFLOW model (Bailey et al., 2017)

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

آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل اصلاح شده SWAT-MODFLOW را نشان می‌دهد.

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 مدل سازی یکپارچه منابع

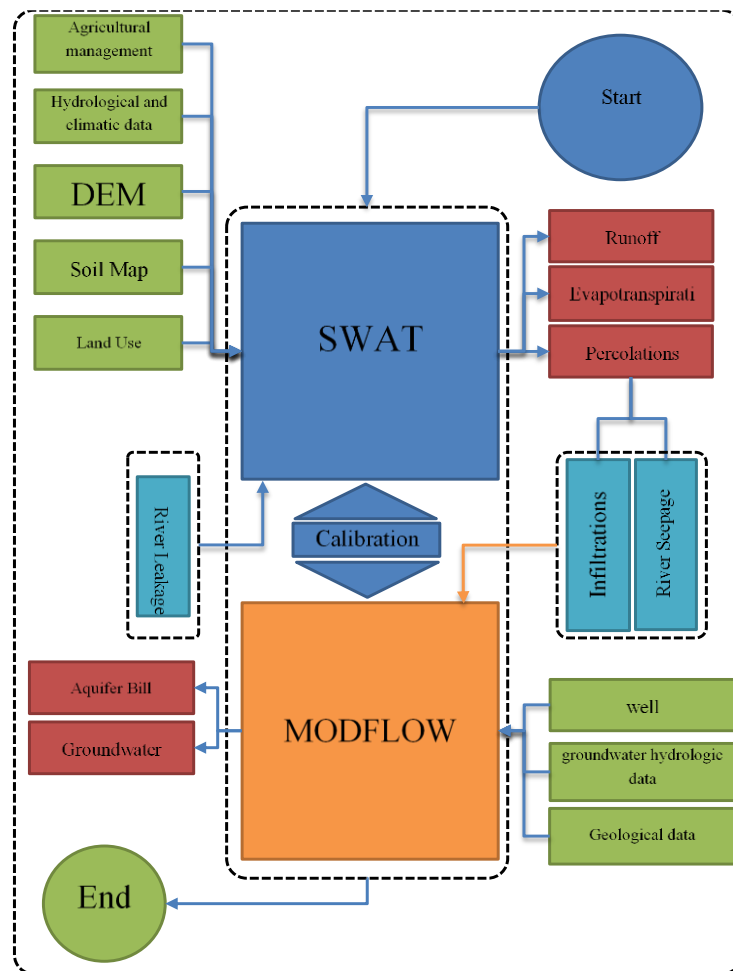


Fig. 6- Flowchart Integrated Modeling Process in SWAT-MODFLOW Integrated Model

شکل ۶- فلوچارت روند مدل سازی تلفیقی در مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW

می‌باشد. شکل ۷-ب نشان‌دهنده واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی واقع در این ناحیه است که در ادامه در شکل ۷-ج 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-د نشان‌دهنده ادغام لایه سلول‌های شبکه MODFLOW و واحدهای هیدرولوژیکی شکسته شده DHRUs می‌باشد. شکل ۷-د 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 جریان‌های سطحی فراهم می‌کنند. با این ترکیب رابطه مکانی بین DHRUs 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.

۸-۲- مدل‌سازی تلفیقی با مدل SWAT-MODFLOW

مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW در بازه ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ در محدوده مطالعاتی تنظیم شد. مقادیر هد هیدرولوژیکی 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-ا قابل مشاهده

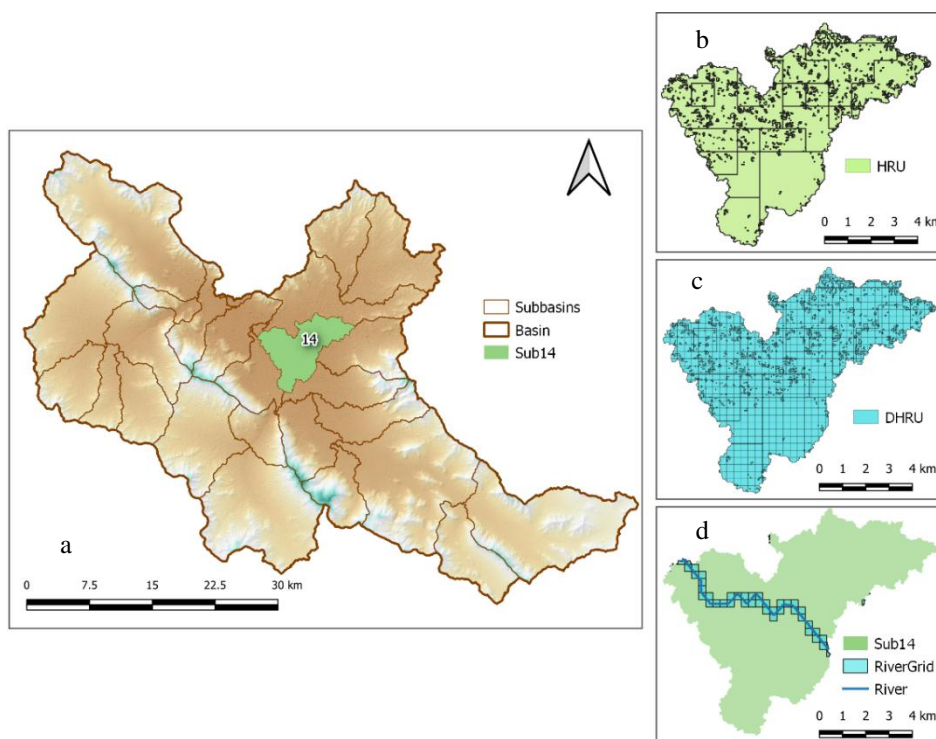


Fig. 7- a) Subarea position 14 in the study area, b) Map of the hydrological response units output from the SWAT model, c) Discrete hydrological units with the integration of the HRU layer and the MODFLOW groundwater model network, d) Flow network cells along the river course in the subbasin 14

شکل ۷-ا) موقعیت زیرحوضه ۱۴ در پهنه محدوده مطالعاتی، (ب) نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی خروجی از مدل SWAT، (ج) واحدهای هیدرولوژیکی گسسته با ادغام لایه HRU و شبکه مدل آب زیرزمینی MODFLOW، (د) سلول‌های شبکه جریان به

همراه مسیر رودخانه در زیرحوضه ۱۴

۹-۲- 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 به منظور 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.

۱۰-۲- 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، با وجود مطرح بودن شاخص‌های بسیاری در بحث مدیریت پایدار، صرفاً از شاخص فنی استفاده شده تا تنها مدیریت پایدار در حوضه منابع آب دیده شود.

۱۱-۲- شاخص آب در دسترس (WAI¹⁷)

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 که مقدار شاخص برابر صفر باشد یعنی عرضه و تقاضا برابرند (Meigh et al., 1999):

$$WAI = \frac{(R + G - D)}{R + G - D} \quad (1)$$

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

۳- نتایج و بحث

۱-۳- 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 به دست آمده 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

۲-۳- جریانات سطحی خروجی در مدل MODFLOW SWAT

پس از آن که 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 خطا سنجی ضریب تبیین و ضریب نش-ساتکلیف 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 ارتقاعی 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

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 مجذور میانگین مربعات خطا برای کل چاه‌های مشاهداتی آبخوان محدوده مطالعاتی به میزان ۱/۷۲ متر در حالت ناماندگار به دست آمد با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در مدل

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 مجذور میانگین مربعات خطا برای کل چاه‌های مشاهداتی آبخوان محدوده مطالعاتی به میزان ۱/۷۲ متر در حالت ناماندگار به دست آمد با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در مدل

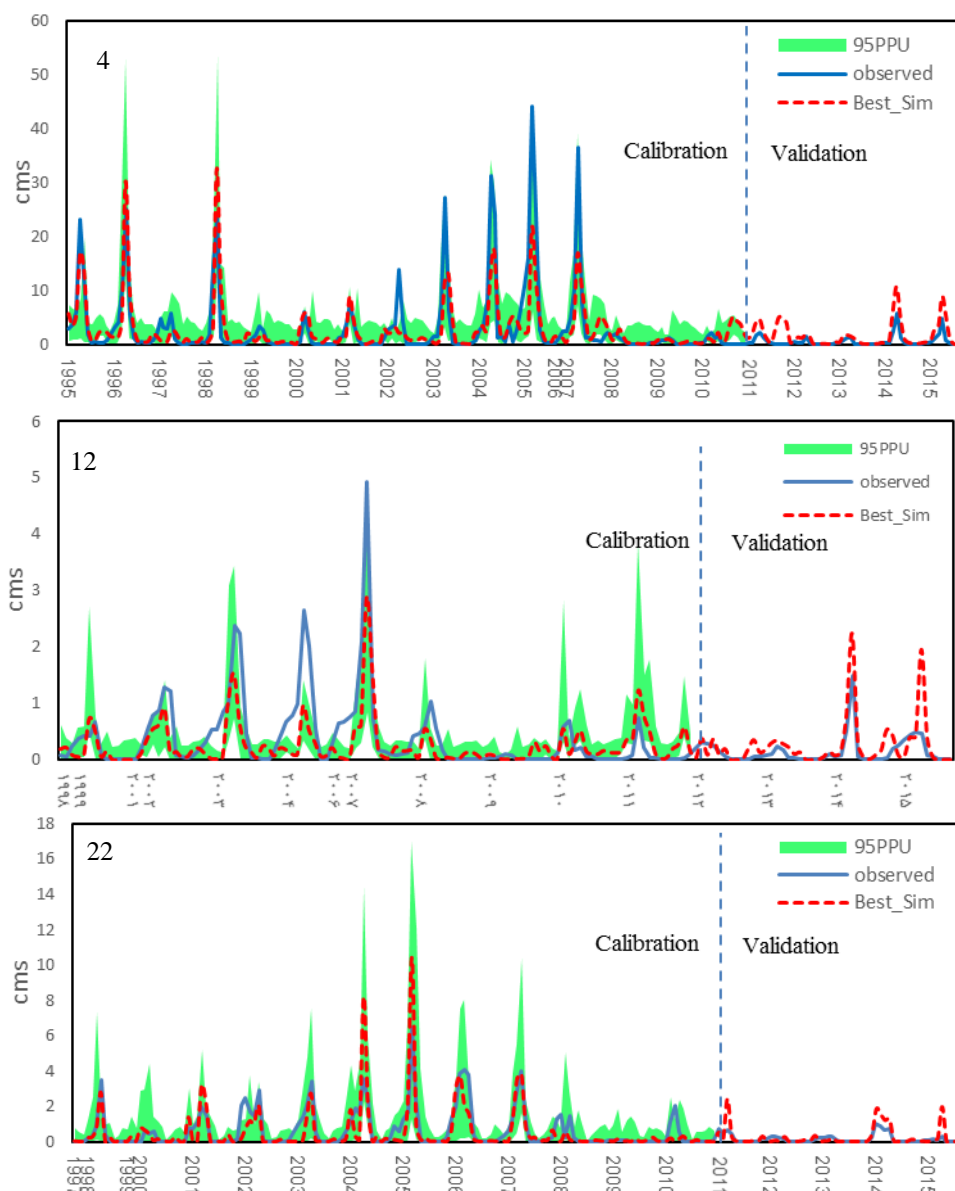


Fig. 8- Graph of simulated values by swat model compared with observation values at 3 stations located in the study area

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

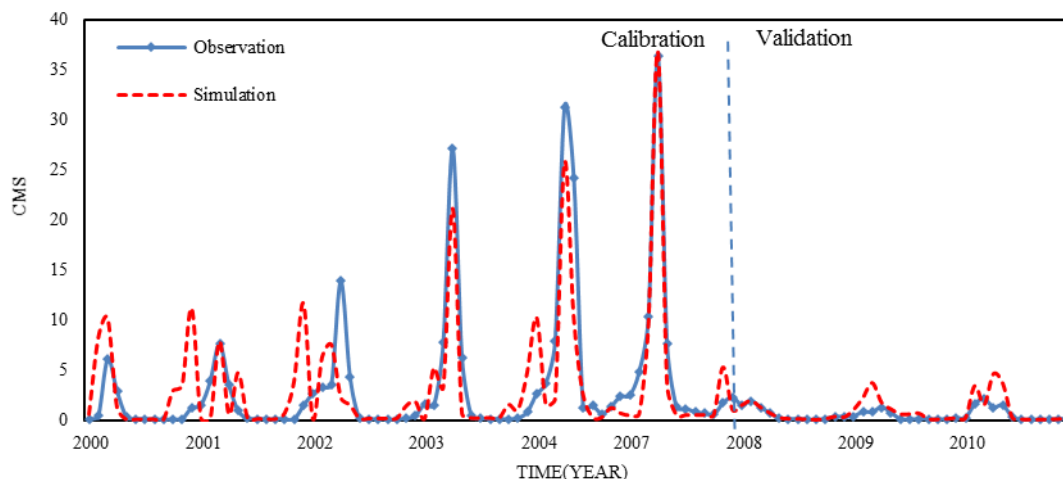


Fig. 9- Simulated Surface Runoff Characteristics in Outlet Zone 4 after Implementation of the Integrated Model

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

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. در نتیجه 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.

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 به صورت 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. در نتیجه 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

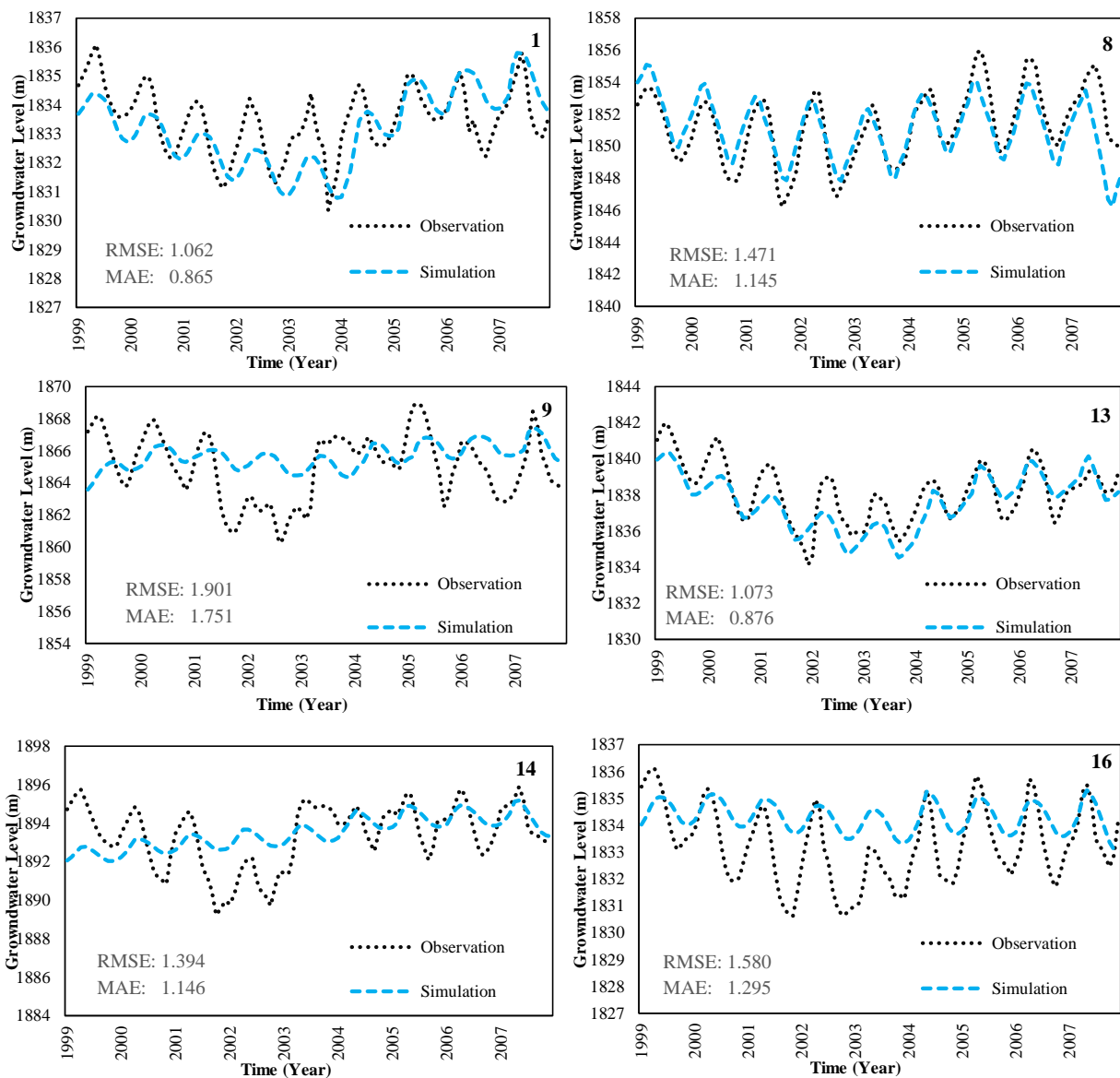


Fig. 10- Indicates the comparison between the time series of the level of observation and computational levels of several wells by the SWAT-MODFLOW model during the calibration period

شکل ۱۰- نشان دهنده مقایسه بین سری زمانی سطح تراز مشاهداتی و محاسباتی چند چاه توسط مدل SWAT-MODFLOW در دوره واسنجی می باشد

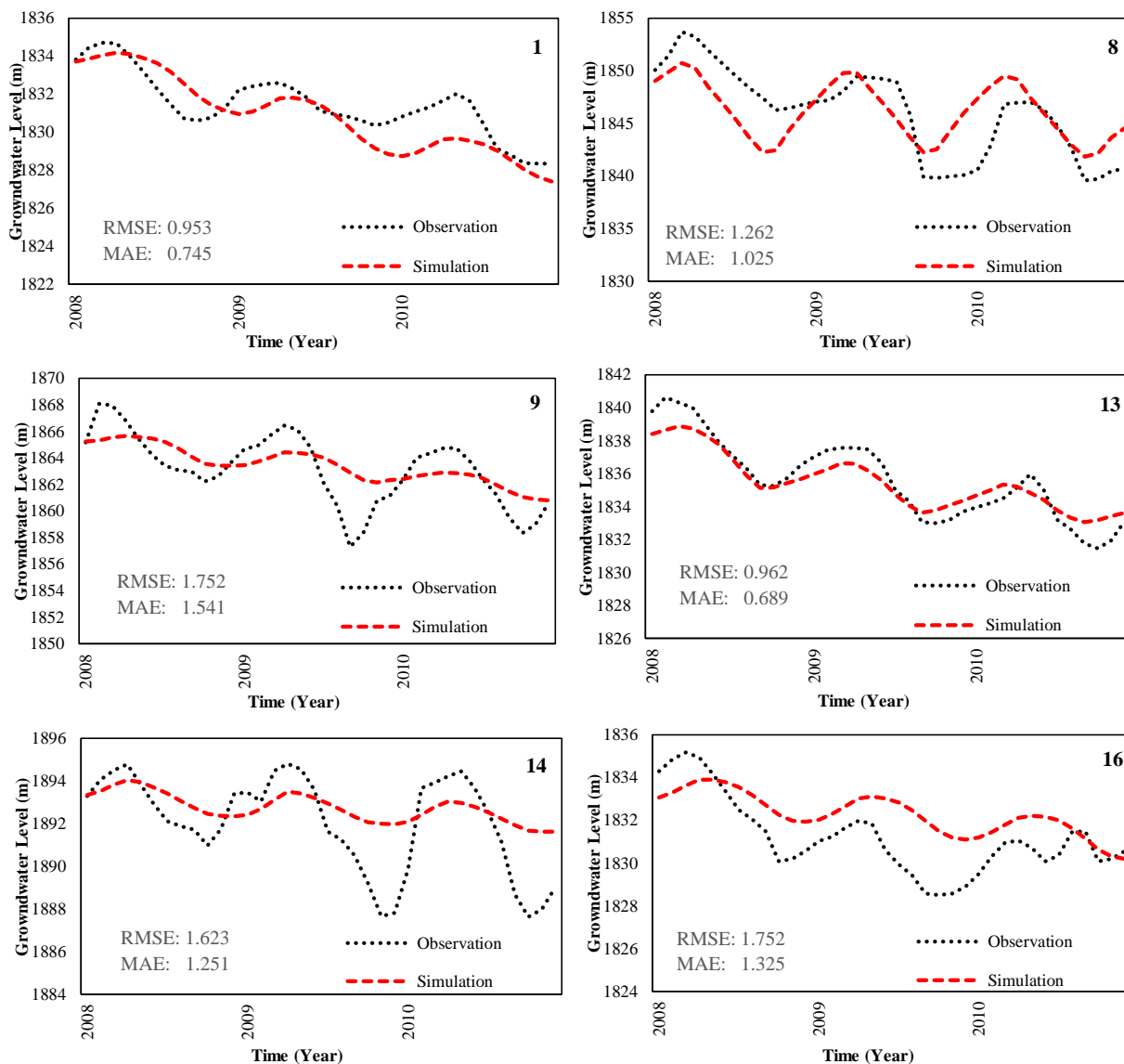


Fig. 11- Represents a comparison between the time series of the level of observation and computational levels of several wells by the SWAT-MODFLOW model during the verification period

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

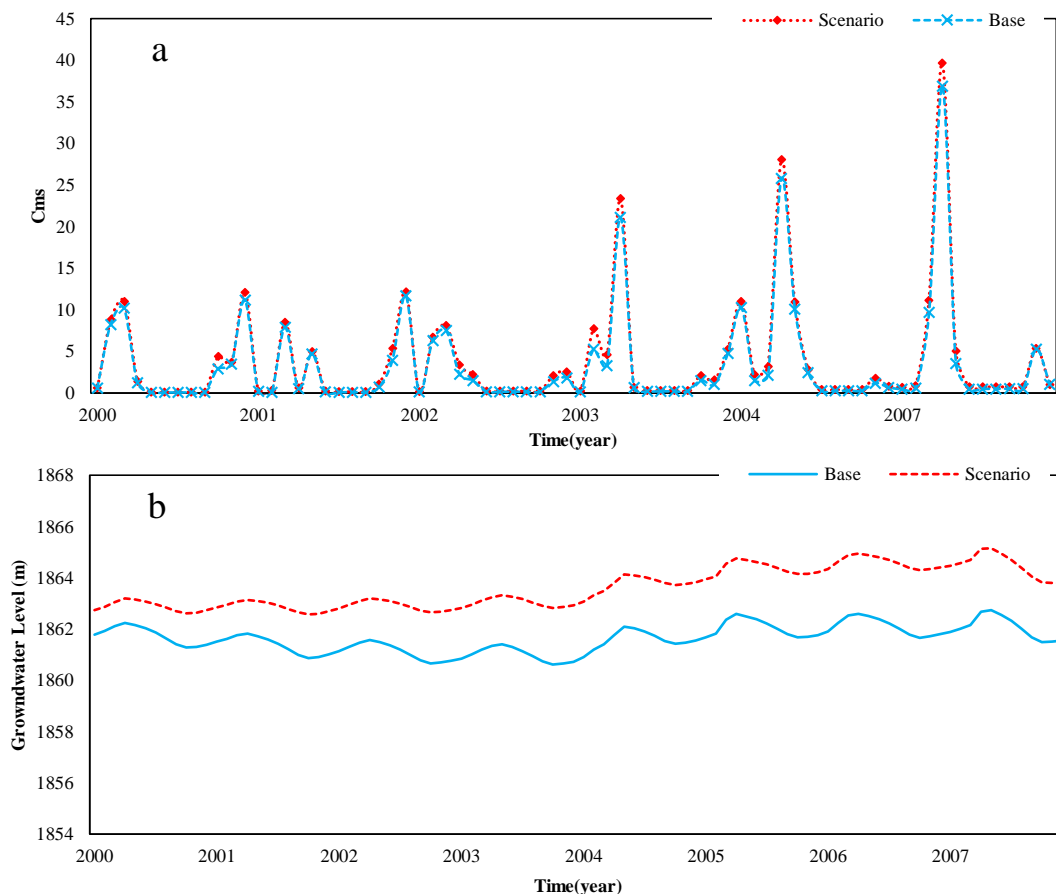


Fig. 12- a) Shows the comparison between surface water levels before and after the scenario b) indicates the level of groundwater level before and after the scenario

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

ایستگاه‌ها و چاه‌های مشاهداتی با پراکنندگی مناسب در سطح حوضه آبریز و مقادیر محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این پژوهش مدل SWAT به صورت 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

۴- خلاصه و نتیجه گیری

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 به منظور 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 شفاء 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

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

Eni 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

Eni 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

طول دوره مدل‌سازی به ترتیب برابر با ۱/۷۲ و ۱/۴۵ متر محاسبه گردید که در حد قابل قبولی می‌باشد. بیان ارائه شده توسط مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر و دقیق‌تر از منابع آب زیرزمینی حاوی نتایج کامل‌تری بود. همچنین بیان کلی منابع آب به صورت پیوسته در این مدل ارائه می‌شود که به منظور اتخاذ تصمیمات مدیریتی در حوضه آبریز بسیار راه‌گشا خواهد بود. به طوری که با بکارگیری سناریوی مدیریتی کاهش برداشت از منابع آب در کنار استفاده از شاخص WAI به منظور 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 Availability Index
- 5- Shallow Groundwater
- 6- SWAT Calibration and Uncertainty Procedures
- 7- Name File Package
- 8- Discretization Package
- 9- Basis Package
- 10- Well Package
- 11- General-Head Boundary Package
- 12- Observation Package
- 13- Upstream Weighting Package
- 14- Recharge Package
- 15- River Package
- 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

- 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, Ramireddygar 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](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 groundwater and surface-water flow model based on the integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005). 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