



Development of Comprehensive Karstic Watershed Model in Order to Make Estimates and Precision for the Components of the Water Balance

M.R. Eini¹, S. Javadi^{2*} and M. Delavar³

Abstract

The various semi-distributed and distributed hydrological models have great potential for water catchment comprehensive simulations, but there still is a need for development in order to give out a more realistic simulation representing the actual conditions of the catchment area. Changes in model codes are required in order to simulate the karstic basins using conventional hydrologic models. The SWAT model, as a free open-source package, offers this possibility to set up and configure various conditions in the catchment area. In this research, a new model called SWAT-ML has been developed in which different hydrological characteristics were assigned to karst regions. The studied area is the karstic basin of Maharlu Lake and the statistical simulation period was selected from 1980 to 2013 for calibration and validation of surface runoff, base flow, agricultural production, and actual evapotranspiration. The model was calibrated with an average of determination factor and Nash Sutcliffe of 0.65, and it was concluded that the SWAT model has a great potential for estimating the yields of agricultural products. The developed model showed better performance in karstic watershed simulation compared to the original SWAT model. The calculated balance values by SWAT and SWAT-ML model showed significant differences compared to hydro climatology budget.

Keywords: Water Balance, Maharlu Lake Basin, Karst, Model, Hydrology.

Received: November 17, 2017

Accepted: July 20, 2018

توسعه مدل جامع حوضه آبریز کارستی به منظور برآورد و تدقیق مؤلفه‌های بیلان آبی

محمد رضا عینی^۱، سامان جوادی^{۲*} و مجید دلاور^۳

چکیده

مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی نیمه توزیعی و توزیعی توانایی بسیار بالایی در شبیه‌سازی جامع حوضه‌های آبریز دارند؛ اما این مدل‌ها همچنان نیاز به توسعه دارند تا بتوانند به شرایط واقعی حوضه‌های آبریز نزدیک شوند. برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز کارستی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی مرسوم احتیاج به تغییراتی در کدهای مدل می‌باشد. مدل SWAT بدلیل متن باز بودن و رایگان بودن این امکان را فراهم آورده است که شرایط مختلف حوضه آبریز را در آن پیاده‌سازی و پیکره‌بندی کرد. در این پژوهش مدل جدیدی به نام SWAT-ML توسعه یافته است که در آن مناطق کارستی دارای خصوصیات متفاوت هیدرولوژیکی می‌باشند. محدوده مورد مطالعه حوضه کارستی دریاچه مهارلو انتخاب و دوره آماری شبیه‌سازی از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۳ برای واسنجی و اعتبارسنجی رواناب سطحی، رواناب پایه، محصولات کشاورزی و تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد. مدل با متوسط ضریب تبیین و نش ساتکلیف ۰/۶۵ واسنجی شد و همچنین مشخص شد که مدل SWAT توانایی زیادی در برآورد مقادیر عملکرد محصولات کشاورزی دارد. مدل توسعه یافته نشان داد که در شبیه‌سازی حوضه آبریز کارستی عملکرد بهتری نسبت به مدل SWAT دارد و مقادیر بیلان محاسبه شده توسط مدل SWAT و SWAT-ML دارای تفاوت معناداری نسبت به بیلان هیدروکلیماتولوژی می‌باشند.

کلمات کلیدی: بیلان آبی، حوضه دریاچه مهارلو، کارست، مدل SWAT، هیدرولوژی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۸/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۴/۲۹

1- M.Sc. Graduate in Water Resources Engineering, College of Aburairhan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2-Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburairhan, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: javadis@ut.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۲- استادیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۳- استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

مقادیر شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NSE^1) برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه (حدود ۰/۲۹ برای دوره واسنجی و ۰/۵ برای دوره اعتبارسنجی)، مناسب نیستند. Benson and Baffaut (2009)، با توسعه مدل SWAT B&B نسبت به کاهش زمان ورود آب از داخل درز و شکاف‌ها به داخل آبخوان اقدام کرده‌اند. این مدل در حوضه رودخانه جیمز در کنتاکی (آمریکا) به مساحت ۳۶۰۰ کیلومتر مربع واسنجی شد و با سایر مطالعاتی که در آن حوضه انجام شده بود مقایسه شد. این مدل نیز بهتر از SWAT توانسته بود فرایند هیدرولوژیکی حوضه را شبیه‌سازی کند. ضریب NSE در مراحل اعتبارسنجی و واسنجی حدود ۰/۵ محاسبه شد. Holman and Vale (2009) به بررسی مدل اولیه SWAT در آبخوان کارستی معلق ساحلی در ولز (جنوب غربی بریتانیا) پرداختند. مقدار NSE از ۰/۶۷ تا ۰/۷۴ در دوره‌های واسنجی و ۰/۵۶ تا ۰/۷۴ در دوره اعتبارسنجی بدست آمد. در همین راستا Nikolaidis et al. (2013) در یک حوضه کارستی در حوضه دریای مدیترانه با در نظر گرفتن چشمه‌ها به عنوان منبع نقطه‌ای خروج آب و با اصلاح کد SWAT برای ایجاد ارتباط بین زیرحوضه‌ها به صورت مستقیم و همچنین با دخالت دادن سناریوهای تغییر اقلیم یک مدل برای شبیه‌سازی کیفیت آب در کنار مدل‌سازی کیفی منطقه کارستی ارائه دادند. Workman and Palanisamy (2015)، با استفاده از مدل توسعه یافته Karst SWAT نسبت به مدل‌سازی درز و شکاف‌ها در بستر رودخانه پرداخته‌اند و با مدل SWAT مقایسه کرده‌اند. مدل توسعه یافته Karst SWAT بهتر از مدل SWAT حوضه را مدل‌سازی کرده است. این مقایسه‌ها به صورت ماهانه و با شاخص NSE و R2 انجام شده است. ضریب NSE برای دوره واسنجی ۰/۸۶ و برای اعتبارسنجی ۰/۸۷ و ضریب تبیین برای دوره واسنجی ۰/۹۵ و برای اعتبارسنجی ۰/۹۸ حاصل شدند. در جدول ۱ برخی از پژوهش‌های انجام شده برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی آب سطحی آمده است.

هدف این پژوهش توسعه مدل جامع هیدرولوژیکی در حوضه کارستی دریاچه مهارلو و محاسبه مؤلفه‌های بیلان خروجی از مدل SWAT و مدل توسعه یافته و مقایسه آن با بیلان هیدروکلیماتولوژی می‌باشد. در این پژوهش علاوه بر واسنجی رواناب سطحی، مقادیر تبخیر تعرق واقعی، عملکرد محصولات کشاورزی و رواناب پایه نیز مورد واسنجی قرار گرفته‌اند. محاسبه بیلان و مقایسه آن با بیلان هیدروکلیماتولوژی برای محدوده شمال دریاچه مهارلو انجام پذیرفته است و از محاسبه بیلان قسمت جنوبی دریاچه به دلیل عدم وجود ایستگاه هیدرومتری و بالابودن عدم قطعیت برای این قسمت از حوضه صرف نظر شده است.

حوضه‌های آبریز با توجه به شرایط اقلیمی، توپوگرافی، خاک منطقه، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و سازه‌های هیدرولوژیکی ساخته شده به دست بشر، رفتارهای متفاوتی نسبت به بارش و رواناب دارند. در این میان حوضه‌های آبریز کارستی با توجه به شرایط ساختاری زمین‌شناسی و اهمیت سازندهای کارستی در تأمین آب شرب مورد توجه پژوهش‌گران قرار دارد. حدوداً ۲۵٪ جمعیت جهان آب مصرفی خود را از آبخوان‌های کارستی تأمین می‌کنند (Ford, 2007). در ایران حدود ۱۱ درصد از سطح کل کشور و حدود ۹۰ درصد از ارتفاعات زاگرس از سازندهای کارستی تشکیل شده است. واژه کارست در لغت به معنای زمین سنگی است، اولین بار در نیمه‌ی دوم قرن نوزدهم میلادی جهت توصیف مناطقی از یوگسلاوی سابق به کار برده شده است. این واژه هم اکنون به مناطقی اطلاق شده است که در آن‌ها آب زیرزمینی باعث توسعه‌ی بازشدگی‌ها و در نتیجه ایجاد یک سیستم زهکشی زیرسطحی نمی‌شود (Afrasyebian, 1998). حال با توجه به اینکه مناطق کارستی و فروچاله‌های آن به صورت پراکنده، با عمق، قطردانه و با قابلیت‌های نفوذ مختلف در حوضه‌های کارستی وجود دارند نمی‌توان رفتار آن‌ها را با مدل‌های هیدرولوژیکی معمول در ایجاد رواناب سطحی به درستی شبیه‌سازی کرد. به همین منظور پژوهش‌های مختلفی به منظور توسعه مدل‌های جدید برای حوضه‌های کارستی پرداخته‌اند. در حالت کلی هدف از توسعه مدل بایستی ایجاد یک مدل با ساختار مناسب‌تر، اجرای بهتر و عدم قطعیت کمتری باشد (Savenije, 2009). اگر در مدل‌سازی نتوان به شرایط واقعی حوضه در شرایط پایه نزدیک شد، سناریوهای مدیریتی هم نمی‌توانند نتایج دقیقی ارائه دهند و خطاهای زیادی را در خود جای خواهند داد. برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز کارستی در سطح بین‌المللی از مدل‌های متفاوتی نظیر SWAT، Karst Flow استفاده می‌کنند (Malagò et al., 2016; Tian et al., 2016; Amin et al., 2017). مدل SWAT به دلیل رایگان بودن، پشتیبانی به روز، متن باز بودن و از همه مهمتر دید جامع و نیمه توزیعی به حوضه آبریز با اقبال بیشتری روبرو است. Spruill et al. (2000) با استفاده از مدل اولیه SWAT نسبت به ارزیابی عملکرد این مدل در یک حوضه کارستی کوچک در مرکز کنتاکی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل اولیه SWAT برای مناطق کارستی مناسب نبوده و نیاز به بازنویسی کد با توجه به فیزیوگرافی حوضه دارد. Afanowicz et al. (2005) نسبت به شبیه‌سازی و تعیین بیلان یک حوضه جنگلی با آبخوان کارستی در تگزاس با استفاده از مدل اولیه SWAT پرداختند. در این پژوهش این مدل نسبت به انتقال مستقیم آب به داخل آبخوان عمیق اصلاح شد. پس از طی شدن مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل مشخص شد که

Table 1- Some of related studies in Karstic Basins
جدول ۱- برخی از پژوهش‌های مرتبط در حوضه‌های کارستی

Study	Model	Goal	Approach
Afinowicz et al. (2005)	SWAT	Water budget	Alteration of base flow code for rapid groundwater undertaking
Amatya et al. (2011)	SWAT	Runoff	Adding of subsurface point source (spring) and alteration of base flow approximation method
Amatya et al. (2013)	SWAT	Phosphorus	Addition of subsurface point source and modification of base flow estimation method
Baffaut and Benson (2009)	SWAT	Runoff and Contaminant	Excruciating groundwater recharge and using high hydraulic conductivity values
Nikolaidis et al. (2013)	SWAT	Hydrology and Contaminant	A adapted karst flow model: upper reservoir and lower reservoir system
Palanisamy and Workman (2015)	SWAT	Sinkholes	Request of orifice flow method incorporated into SWAT model for sinkhole modeling
Spruhill et al. (2000)	SWAT	Runoff	Regular SWAT model parameterization
Yactayo (2009)	SWAT	Hydrologic Process	Permitting overland flow and lateral flow from upstream areas to recharge the sinkholes

میلیمتر و دمای متوسط این منطقه ۱۷/۴ درجه سلسیوس ذکر شده است. در این پژوهش ۳ ایستگاه مشاهداتی هواشناسی در نظر گرفته شده است. همچنین از ۳ ایستگاه آب‌سنجی چنار سوخته نهر اعظم، چنار سوخته رود خشک و باغ صفا برای واسنجی و اعتبارسنجی رواناب منطقه استفاده شده است. سه محصول عمده منطقه یعنی گندم آبی، زیتون و انگور با توجه به مساحت زیرکشت آن‌ها وارد مدل شدند. در این پژوهش طول دوره آماری از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۱۳ انتخاب شده است. برای مدل‌سازی از سال ۱۹۸۰ تا سال ۱۹۸۳ برای دوره Warm up استفاده و از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۰ برای دوره واسنجی و از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۲ نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و لایه رقیومی ارتفاعی مورد استفاده آمده است.

۲-۲- مدل هیدرولوژیکی SWAT

مدل SWAT از سال ۱۹۹۸ تا سال ۲۰۱۱ در اداره تحقیقات کشاورزی آمریکا (USDA-ARS) توسعه یافته است. این مدل بر پایه و اساس فیزیکی، نیمه توزیعی، در مقیاس حوضه، برای زمان پیوسته و با تأکید بر فرآیندهای سطح خاک توسعه یافته است. این مدل یک حوضه آبریز را با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده، به چندین زیر حوضه 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 به عنوان یک HRU شناخته می‌شوند و معادلات موجود در مدل برای هر HRU محاسبه می‌شود. ارتباط مکانی بین زیر حوضه‌ها و خروجی آن‌ها به طور پیوسته برقرار می‌شود و در نهایت به خروجی حوضه اصلی ختم می‌گردد (Arnold et al., 2012).

با بررسی سوابق پژوهش‌های انجام شده مشخص شد که مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌های کارستی می‌تواند با افزایش مقادیر نفوذ یا با طراحی و قرار دادن فروچاله در مدل SWAT با اصلاح کدهای آن، دقت بالاتری در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی داشته باشد. در این پژوهش مدل جدیدی به نام مدل SWAT-ML (Maharlu Lake) توسعه داده شده است که در آن برای مناطق کارستی مقادیر نفوذ افزایش و برگشت آب زیرزمینی به آب سطحی کاهش یافته است. در مطالعات پیشین این تغییرات در کل حوضه آبریز اعمال شده بود، اما با توجه به اینکه در این حوضه بخش‌هایی از آن کارستی می‌باشد، مدل به صورت توزیعی توسعه یافته است تا عدم قطعیت‌های مدل‌سازی کاهش یابد. در مرحله بعد مدل توسعه یافته با مدل اولیه SWAT در شبیه‌سازی رواناب سطحی، رواناب پایه و سایر پارامترهای بیلان آبی مقایسه شده است. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به توسعه مدل جدیدی به نام مدل SWAT-ML برای حوضه آبریز کارستی دریاچه مهارلو برپایه مدل SWAT 2012 اشاره کرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه دریاچه مهارلو به وسعت ۴۲۷۰ کیلومتر مربع در استان فارس واقع شده است. این محدوده مطالعاتی در حوضه آبریز فلات مرکزی و در تقسیمات حوضه آبریز دریاچه‌های طشک بختگان و مهارلو قرار دارد. حوضه دریاچه مهارلو بین عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و یک دقیقه تا ۳۰ درجه و ۶ دقیقه شمالی و طول‌های ۵۲ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱). متوسط بارش ثبت شده در این منطقه در طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۳ برابر با ۳۶۸

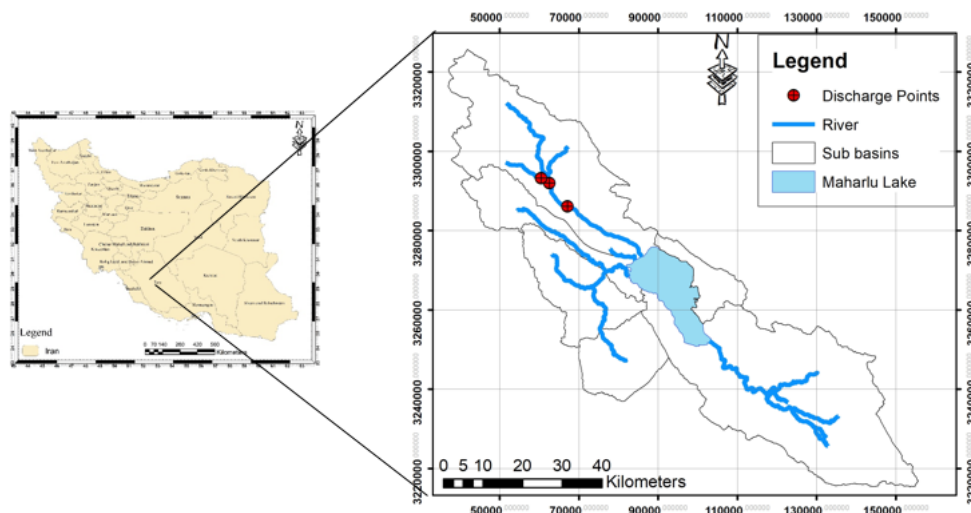


Fig. 1- Location of the case study area, riverine network and hydrometric stations in Maharlu Basin
 شکل ۱- موقعیت مکانی حوضه دریاچه مهارلو، ایستگاه‌های آبسنجی و رودخانه‌ها در حوضه دریاچه مهارلو

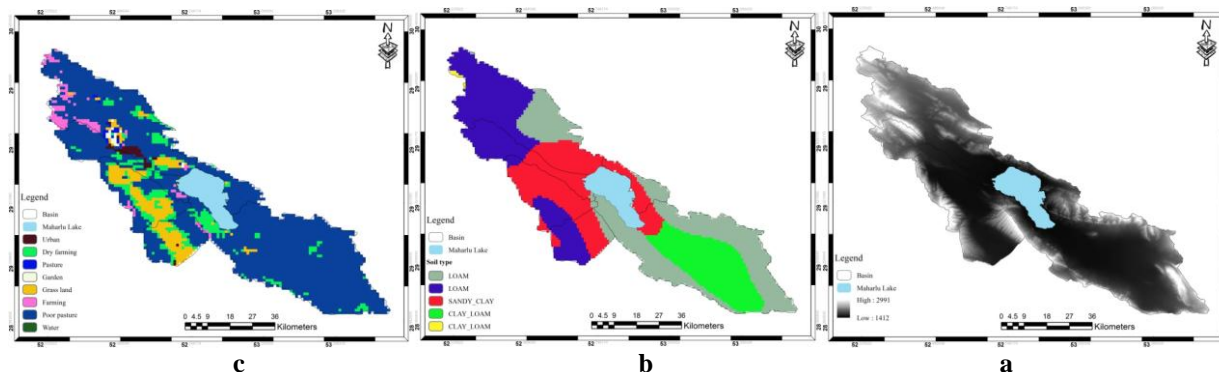


Fig. 2- Map of DEM (a), Soil (b) and Land Use (c) in Maharlu Basin
 شکل ۲- نقشه DEM (a)، خاک (b) و کاربری اراضی (c) در حوضه مهارلو

است. درنهایت با ایجاد حلقه برای هریک از HRU های کارستی این روابط از یکدیگر جدا شده و برای مناطق کارستی پارامتر X واسنجی شده است. همچنین در همین زیربرنامه در بخش تبادل آب سطحی و زیرزمینی در مناطق کارستی، آب برگشتی به آب سطحی ناچیز در نظر گرفته شده است.

$$rchrg(j) = (1.-gw_delaye(j)) * (sepbtm(j) + gw_ru(j) + gw_delaye(j) * rchrg1) \quad (1)$$

$$rchrg(j) = (1.-(Exp(-1./((delay(j))/X)))) * (sepbtm(j) + rchrg_karst) + ((+ gw_ru(j) / (Exp(1./((delay(j))/X)))) * rchrg1) \quad (2)$$

میزان نفوذ روزانه به آبخوان آزاد از هر HRU (mm)، delay، تأخیر زمانی (روز)، sepbtm تراوش روزانه به لایه‌های پایینی خاک از جریان سطحی (mm)، rchrg-imp مقادیر روزانه تراوش از دریاچه و تالاب و هدر رفت از شاخه‌های فرعی رودخانه (mm) و rchrg1 مقدار آب نفوذ یافته به داخل آبخوان در روز قبل (mm). در شکل ۲ روندنمای مراحل محاسبات در مدل SWAT و محل تغییرات در کدهای آن

۳-۲- رویکرد شبیه‌سازی حوضه کارستی و توسعه مدل

در این پژوهش نفوذ به آب زیرزمینی به دو بخش تغذیه از سطح خاک (غیرمستقیم) و تغذیه از رواناب سطحی (مستقیم) تقسیم شده است. زمان تأخیر نفوذ در مناطق کارستی کمتر و همچنین مقادیر آب برگشتی از آب زیرزمینی به آب سطحی ناچیز در نظر گرفته شده است. در رابطه ۱ پارامترهای این رابطه آمده است. در این رویکرد رابطه ۱ برای HRU های کارستی به صورت رابطه ۲ نوشته می‌شود و در سایر HRU ها به صورت رابطه ۱ باقی می‌ماند. بخشی از تغییرات در کدهای مدل SWAT در ادامه آمده است. در این رابطه، بخش gw_delaye(j) به صورت رابطه اصلی خود نوشته می‌شود تا بتوان به صورت مستقیم به پارامتر delay(j) در زیربرنامه مربوطه یعنی gwmode دسترسی پیدا کرد. در واقع بخش gw_delaye(j) یا تأخیر در نفوذ به آب زیرزمینی در هر روز به $(Exp(-1./((delay(j))/X)))$ تبدیل شده است. پارامتر X پارامتر بدون بعدی می‌باشد که زمان تأخیر نفوذ به آن تقسیم می‌شود و در این پژوهش مورد واسنجی قرار گرفته

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- پیکره‌بندی مدل

پیکره‌بندی مدل به منظور استخراج آبراهه و زیرحوضه‌ها با استفاده از نقشه DEM اصلاح شده با دقت ۱۵ متری انجام گرفت. با توجه به مقادیر حد آستانه و ایجاد خروجی به منظور فرارگیری ایستگاه‌های هیدرومتری، ۲۲ زیرحوضه تشکیل شد. مدل SWAT به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی و بالاتر رفتن دقت شبیه‌سازی، حوضه را به واحدهای کوچکی به نام واحد پاسخ هیدرولوژیکی یا HRU تقسیم می‌کند. تعیین HRU ها بر اساس ترکیب خاک، کاربری اراضی و شیب منطقه با در نظر گرفتن باندهای ارتفاعی برای هر زیرحوضه در نظر گرفته می‌شود. همچنین به منظور بالاتر رفتن دقت مدل، در این تحقیق مناطق کشاورزی نقشه کاربری اراضی به دو بخش دیم و آبی زراعی و باغی با توجه به الگوهای کشت غالب تقسیم و در نهایت پس از اعمال این تنظیمات، تعداد HRU های منطقه ۱۵۹ عدد تعیین شد.

۳-۲- واسنجی و اعتبارسنجی رواناب سطحی

مرحله واسنجی مدل برای رسیدن به نتیجه مطلوب در شبیه‌سازی رواناب سطحی، با استفاده از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شده است.

آمده است. این تغییرات در نرم‌افزار Visual Studio 2012 و با کامپایلر Intel Fortran اصلی SWAT 2012 rev.664 در مناطق کارستی که اعمال شده است و مدل جدیدی توسعه یافته است. مناطق کارستی که در این پژوهش به عنوان مناطق کارستی در نظر گرفته شدند در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴-۲- واسنجی و تحلیل عدم قطعیت با نرم‌افزار SWAT-CUP

نرم‌افزار SWAT-CUP برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT عرضه شده است. این نرم‌افزار قادر است با روش‌های SUFI2، PSO، GLUE، ParaSol و MCMC عملیات واسنجی و تحلیل عدم قطعیت را انجام دهد. در این پژوهش از روش SUFI2 برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. این روش برای واسنجی مدل SWAT به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیارهای سنجش عدم قطعیت در روش SUFI2 روشی بر مبنای تصادفی است و بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌شود که تمام داده‌ها درون باند عدم قطعیت قرار گیرند و متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین به صفر نزدیک باشد.

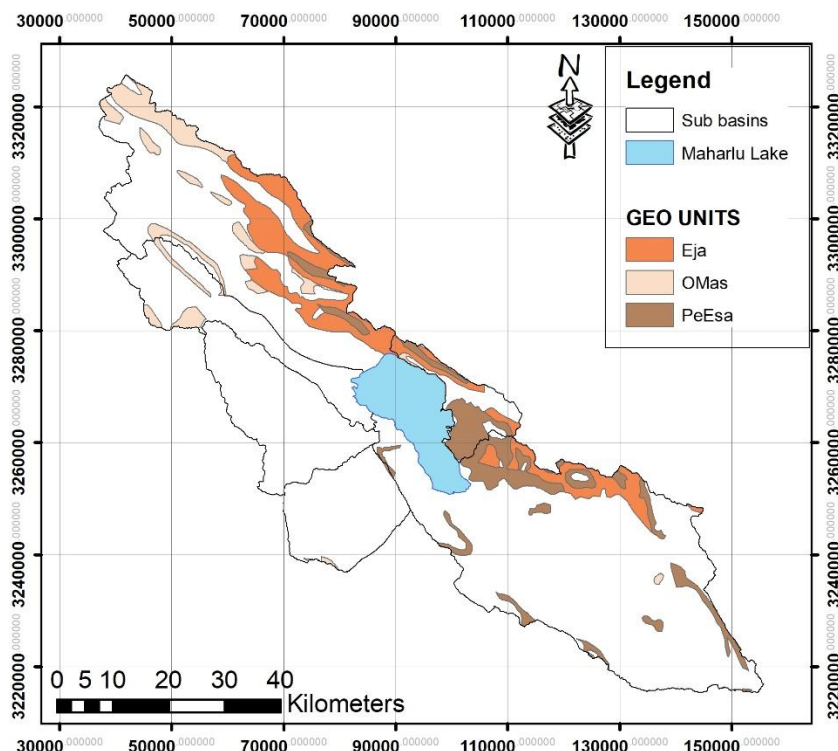


Fig. 3- Karstic geo units in Maharlu Lake basin

شکل ۳- واحدهای زمین‌شناسی کارستی حوضه آبریز دریاچه مهارلو

مدل توانست برای سه ایستگاه آب‌سنجی مقادیر ضریب تبیین را بالای ۰/۶ برای دوره واسنجی و بالای ۰/۶۵ برای دوره اعتبارسنجی نشان دهد. بهترین نتیجه مربوط به ایستگاه چنارسوخته خشک با مقدار ۰/۷۲ در واسنجی و ۰/۸۱ در دوره اعتبارسنجی و همچنین ضریب نش ساتکلیف ۰/۷۲ برای دوره واسنجی و ۰/۷۸ دوره اعتبارسنجی بود. در شکل ۴ تغییرات رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی آمده است.

۳-۳- واسنجی عملکرد محصولات کشاورزی و تبخیر تعرق واقعی

در این حوضه آبریز به دلیل وجود محصولات کشاورزی در حدود ۱۵٪ از مساحت کل منطقه و تأثیر مستقیم تبخیر و تعرق بر روی مؤلفه‌های بیلان آبی، محصولات کشاورزی عمده حوضه یعنی گندم آبی، زیتون و انگور به عنوان نماینده از کشت آبی، باغ و محصولات دیم و با در نظر گرفتن مقادیر آب مورد نیاز این محصولات وارد مدل شدند. پارامترهایی که در واسنجی تبخیر و تعرق گیاهی در مدل واسنجی شده اند، در جدول ۴ آمده است. در جدول ۵ مقادیر تبخیر تعرق واقعی برای هر محصول که در یک سال با شرایط آبی مناسب (بدون استرس آبی) از مدل استخراج شده است و با اطلاعات مندرج در سند ملی آب مقایسه شده است.

در این حوضه آبریز پارامترهای CN2 که بیانگر شماره منحنی در شرایط متوسط رطوبتی حوضه است، بیشترین تأثیر بر روی رواناب را از خود نشان داد. پارامترهای مربوط به جریان پایه که با آب زیرزمینی نیز در ارتباط هستند، در مدل حساسیت بالایی از خود نشان دادند. پارامترهای مربوط به خاک نظیر Sol_BD و Sol_AWC در کنار پارامترهایی نظیر زمان تاخیر آب سطحی، شیب متوسط زیرحوضه و هدایت هیدرولیکی آبراهه نیز در کنار پارامترهای ذکر شده بیشترین حساسیت را داشتند. در جدول ۲ مقادیر نهایی برخی از پارامترهای حساس آمده است.

ارزیابی و تحلیل مطلوبیت عدم قطعیت نتایج مدل با استفاده از شاخص‌های P-factor و R-factor انجام شد. شاخص P-factor بیانگر درصدی از داده‌های مشاهداتی است که در باند ۹۵ درصد اطمینان شبیه‌سازی شده توسط مدل قرار می‌گیرد و شاخص R-factor بیانگر متوسط ضخامت باند عدم قطعیت ۹۵ درصد اطمینان تقسیم بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی می‌باشد. مقادیر بیشتر P-factor و کمتر R-factor بیانگر نتایج بهتر مدل در شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد. در جدول ۳ مقادیر شاخص‌های R-factor و P-factor برای سری زمانی رواناب شبیه‌سازی شده آمده است.

Table 2- Some of sensitive parameters and the up and low bands

جدول ۲- برخی از پارامترهای حساس و باند بالا و پایین

Parameter	Unit	Method	Low and up band of sensitive parameters	
			SWAT model	
SHALLST.gw	mm	v	[3 , 127]	
GW_DELAY.gw	day	v	[10 , 20]	
GW_REVAP.gw	-	v	[0.015 , 0.016]	
PLAPS.sub	-	v	[1 , 8]	
TLAPS.sub	-	v	[7 , 10]	
CN2.mgt	-	r	[-0.01 , 0.38]	
HURU_SLP.hru	mm	v	[0.75 , 0.84]	
LAT_TTIME.hru	day	v	[22 , 32]	
SOL_BD.sol	-	r	[-0.019 , 0.5]	
ALPHA_BF.gw	-	v	[0.46 , 0.63]	
SOL_AWC.sol	-	r	[-0.5 , -0.3]	

در جدول ۶ نتایج عملکرد محصولات کشاورزی واسنجی شده و مقادیر ثبت شده در گزارش‌های وزارت نیرو در سال ۱۳۹۱ آمده است. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی محصولات کشاورزی توسط مدل SWAT به صورت قابل قبولی انجام شده است.

Table 3- Results of uncertainty analysis

جدول ۳- نتایج تحلیل مقادیر عدم قطعیت مدل

Station		P-factor	R-factor
Chenar Sokhte Azam	Calibration	0.49	0.39
Chenar Sokhte Khoshk	Calibration	0.47	0.48
Bagh Safa	Calibration	0.51	0.34

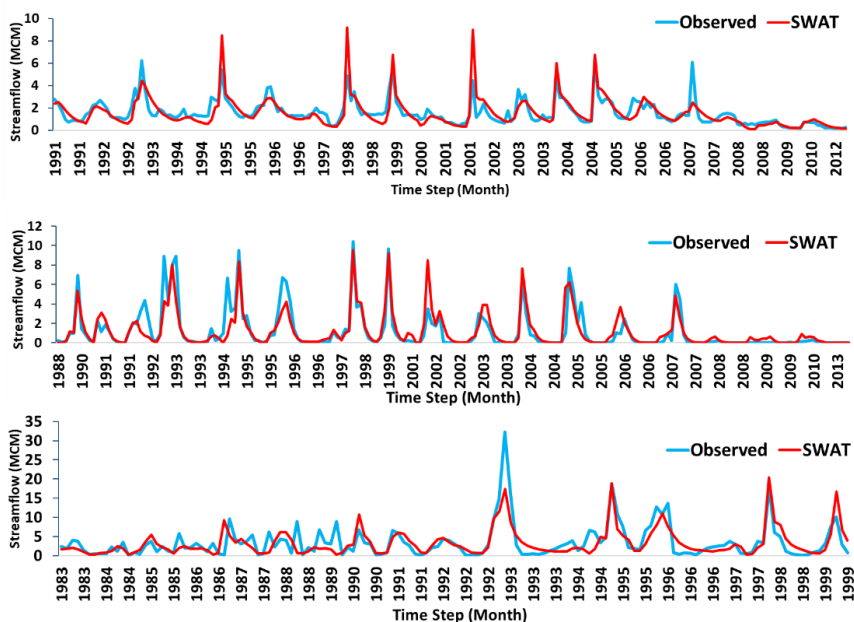


Fig. 4- Runoff time series of the calibrated model with SWAT model
 شکل ۴- سری زمانی رواناب مدل واسنجی شده با مدل SWAT

Table 4- Final values of the parameters affecting evapotranspiration for each product

جدول ۴- مقادیر نهایی پارامترهای مؤثر بر تبخیر و تعرق به تفکیک هر محصول

Wheat	Value	Olive	Value	Grape	Value
BLAI	4	BLAI	5.9	BLAI	7.5
HVSTI	1	HVSTI	0.9	HVSTI	1.15
DLAI	1	DLAI	0.99	DLAI	0.99
FRGRW1	0.1	FRGRW1	0.1	FRGRW1	0.1
LAIMX1	0.1	LAIMX1	0.4	LAIMX1	0.15
FRGRW2	0.45	FRGRW2	0.5	FRGRW2	0.5
LAIMX2	0.95	LAIMX2	0.95	LAIMX2	0.75
T_BASE	3	T_BASE	18	T_BASE	18
T_OPT	22	T_OPT	28	T_OPT	30
EXT_COEF	3	EXT_COEF	0.65	EXT_COEF	0.65
BIO_E	75	BIO_E	60		
GSi	5	GSi	5		
VPDFR	4	VPDFR	4		
BIO_LEAF	9	BIO_LEAF	0.9		

Table 6- Values of Simulated Product Yield (kg /ha)

جدول ۶- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی محصولات (کیلوگرم در هکتار)

Plant	Yield (Kg/ha)	
	Observed	Simulated
Wheat	5322	4638
Olive	1461	1699
Grape	3325	3035

Table 5- Comparison of the simulated values for the real annual evapotranspiration

جدول ۵- مقایسه مقادیر متوسط تبخیر و تعرق واقعی سالانه شبیه‌سازی شده

	Wheat			Olive	Grape
	SWAT	ETa	Observed	Observed	Observed
SWAT	491	836	296		
ETa	390	920	380		

غیرمنطقی می‌شد که باعث خارج شدن نتایج شاخص‌های آماری از بازه مورد قبول می‌شد، اما در مقادیر کمتر از ۰/۱ تا ۰/۰۵ تغییرات در شاخص‌های آماری کمتر و در مقدار ۰/۰۲ بهترین شرایط بوجود آمد. در شکل ۵ بهترین سری زمانی شبیه‌سازی شده توسط SWAT-ML در مدل‌سازی آمده است. در جدول ۷ نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT و SWAT-ML آمده است.

۳-۵- ارزیابی مقادیر نفوذ یافته در یک HRU کارستی

در یک HRU کارستی مقادیر نفوذ و نفوذ به آبخوان عمیق تعیین شده است. این مقادیر در جدول ۸ برای هر یک از مدل‌ها و دوره متوسط بلند مدت آمده است. این مقادیر نشان می‌دهد که مقادیر نفوذ در یک HRU ثابت با هر یک از مدل‌ها چه تغییراتی دارد. این نتایج نشان دهنده این موضوع می‌باشد که مدل توسعه یافته در HRU کارستی مقادیر نفوذ را بیشتر برآورد کرده است.

۳-۴- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی با مدل SWAT-ML

در این پژوهش مدل توسعه یافته در SWAT2012 در شبیه‌سازی حوضه آبریز کارستی و به صورت توزیعی با نام (Maharlu Lake) SWAT-ML نام گرفت. در این مدل پس از واسنجی، مقادیر زمان تأخیر نفوذ در HRU های کارستی بعد از سعی و خطا و آزمودن مقادیر مختلف در مدل، به یک دهم کاهش یافت و ضریب برگشت آب از آب زیرزمینی به آب سطحی به مقدار ۰/۰۲ تعیین شد. هرچه زمان تأخیر به اعداد بزرگتری تقسیم شد، دبی‌های پیک شبیه‌سازی شده به مقادیر واقعی نزدیک تر شدند و مقادیر پیک بعد از تقسیم زمان تأخیر به اعداد بالاتر از ۱۰ افت بیشتری پیدا کردند، بنابراین مقدار واسنجی شده پارامتر X که در معادله ۲ آمده است ۱۰ تعیین شد. همچنین نتایج این رویکرد در برآورد دبی پایه و مقادیر نفوذ در بیلان تأثیرگذار بوده است. تغییرات ضریب بازگشت از آب زیرزمینی به آب سطحی در مقادیر بالاتر از ۰/۱ در روند تغییرات رواناب پایه و دبی‌های پیک دچار تغییرات

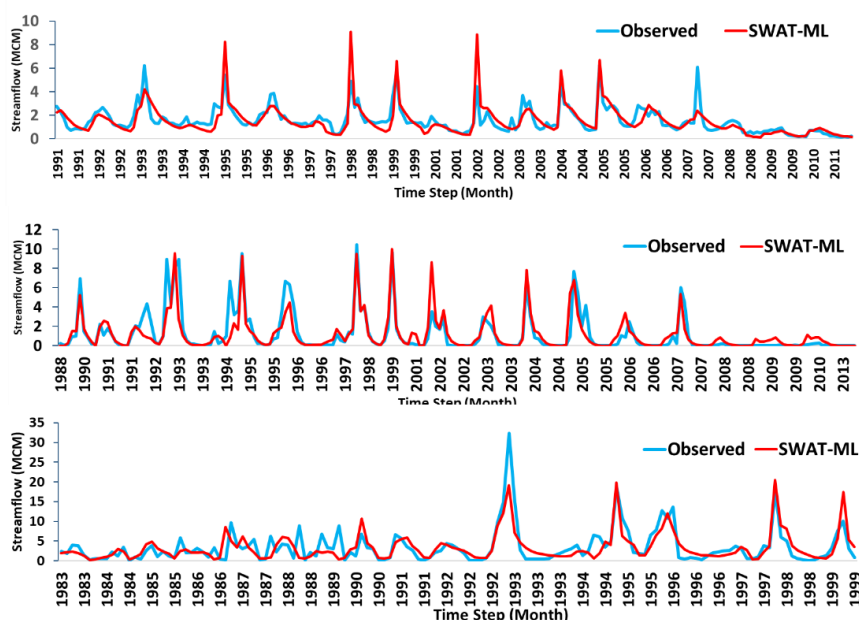


Fig. 5- Runoff time series of calibrated model with SWAT-ML model

شکل ۵- سری زمانی رواناب مدل واسنجی شده با مدل SWAT-ML

Table 7- Results of calibration and validation of SWAT and SWAT-ML model

جدول ۷- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی با مدل SWAT و SWAT-ML

Station		R2		NS	
		SWAT	SWAT-ML	SWAT	SWAT-ML
Chenar Sokhte Azam	Calibration	0.68	0.71	0.52	0.66
	Validation	0.73	0.75	0.6	0.64
Chenar Sokhte Khoshk	Calibration	0.72	0.75	0.72	0.77
	Validation	0.81	0.80	0.78	0.77
Bagh Safa	Calibration	0.6	0.64	0.6	0.62
	Validation	0.65	0.67	0.66	0.67

شکل ۶ تا ۸ سری زمانی دبی پایه و نمودار پراکنش هریک از رویکردها در هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری آمده است.

با توجه به ضریب تبیین که در شکل‌های ۶ تا ۸ آمده است، مشخص شد که در شبیه‌سازی دبی پایه مدل SWAT-ML توانسته است عملکرد بهتری نسبت به مدل SWAT داشته باشد و از مدل SWAT دبی پایه را برآورد کنند.

Table 8- Evaluation of Infiltration Values in a Karstic HRU with the two Models

جدول ۸- ارزیابی مقادیر نفوذ در یک HRU کارستی با

مدل‌های مختلف

Model	Infiltration (mm)	Deep Aquifer Recharge (mm)
SWAT-ML	282	11
SWAT	184	1

۳-۶- ارزیابی دبی پایه

به منظور بررسی انطباق بیشتر مدل‌سازی با داده‌های مشاهداتی، نسبت به بررسی همبستگی دبی پایه مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT اقدام شد. جهت جداسازی دبی پایه از کد BaseFlow استفاده شد. این کد توسط Arnold et al. (1999) توسعه یافته است که در این روش از شیب منحنی افت جریان برای تخمین آب موجود در آبراهه و مقادیر نفوذ به آبخوان سطحی را به صورت اتوماتیک تخمین می‌زند و مقدار شیب منحنی افت جریان را به صورت خودکار با تعداد داده‌ها محاسبه می‌کند. در این روش ۲ پارامتر NDMAX و NDMIN به ترتیب حداقل و حداکثر روزهای مورد نیاز برای محاسبه ضریب ثابت افت، مورد استفاده قرار می‌گیرد که به ترتیب ۳۰ و ۱۵۰ در این پژوهش تعیین شده‌اند. مقایسه‌های دبی پایه برای هریک از رویکردهای شبیه‌سازی انجام شده است.

۳-۷- مؤلفه‌های بیلان آبی

در این بخش مؤلفه‌های بیلان منطقه با خروجی‌های بدست آمده توسط مدل SWAT و SWAT-ML با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مؤلفه‌ها شامل بارش، تبخیر و تعرق حقیقی، متوسط جریان خروجی از دشت، نفوذ به آب زیرزمینی، دبی پایه و آب برگشتی می‌باشد.

همانطور که ذکر شد به دلیل عدم قطعیت بالای مناطق جنوبی دریاچه مهارلو فقط قسمت شمالی دریاچه در این بخش مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جدول ۹ مقادیر مؤلفه‌های اصلی بیلان آمده است. مقادیر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده بیشتر از مقادیر گزارش شده در بیلان کلیماتولوژی محاسبه شده‌اند، رواناب خروجی از دشت دارای اختلاف کمی نسبت به یکدیگر هستند.

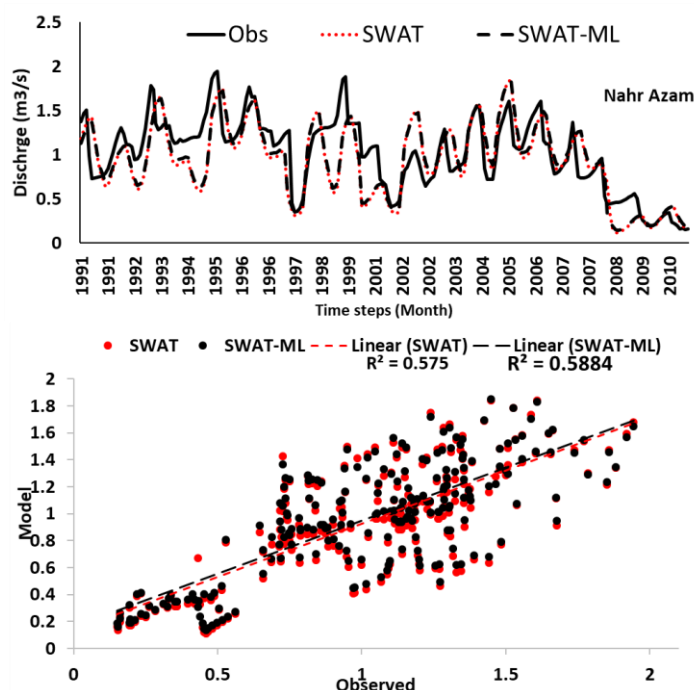


Fig. 6- Base Flow time series and scatter in Chenarsokhte Nahr Azam station

شکل ۶- سری زمانی و پراکنش دبی پایه در ایستگاه چنار سوخته نهر اعظم

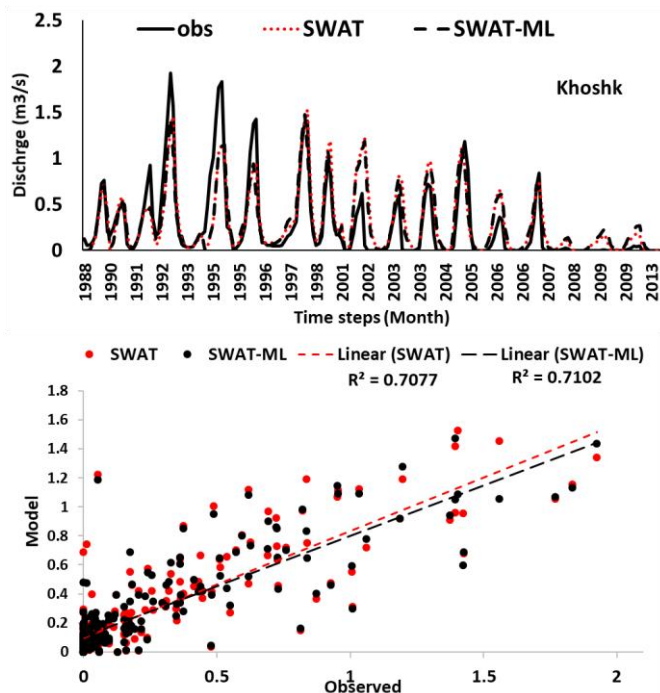


Fig. 7- Base Flow time series and scatter in Chenarsokhte Rod Khoshk station

شکل ۷- سری زمانی و پراکنش دبی پایه در ایستگاه چنار سوخته رود خشک

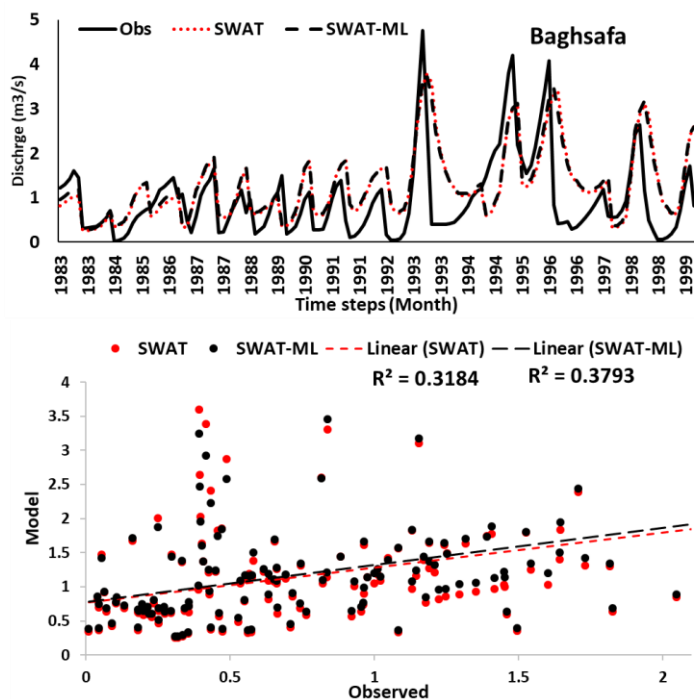


Fig. 8- Base Flow time series and scatter in Baghsafa station

شکل ۸- سری زمانی و پراکنش دبی پایه در ایستگاه باغ صفا

توجه به نتایج حاصل که در جدول فوق آمده است، مدل SWAT-ML، مقادیر نفوذ به آب زیرزمینی را بیشتر از مدل SWAT برآورد کرده است.

مقادیر نفوذ به آب زیرزمینی در شبیه‌سازی‌ها کمتر از مقادیر برآوردی بیلان هیدروکلیماتولوژی محاسبه شده‌اند، دبی پایه شبیه‌سازی شده و برآوردی نزدیک به یکدیگر و آب برگشتی محاسبه شده توسط مدل‌های توسعه یافته بیشتر از مدل SWAT بدست آمده است.

Table 9- The values of main components of the water budget in the study area

جدول ۹- مقادیر مؤلفه‌های اصلی بیلان در محدوده مورد پژوهش

Approach	P (mm)	Eta (mm)	Flow Out (cms)	Deep Aquifer Recharge (MCM)	Base Flow (cms)	Return Flow to Groundwater (MCM)
SWAT	540	289	1.65	144	0.832	43
SWAT-ML	540	271	1.66	159	0.773	73
Climatology	540	242	1.68	197	0.749	61

پژوهش با یک مدل نیمه توزیعی نشان داد که مقادیری مانند نفوذ در گزارشات که به صورت یکپارچه محاسبه می‌شوند، کمتر برآورد شده‌اند.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت مدیریت منابع آب وزارت نیرو به دلیل حمایت مالی از پروژه تحقیقاتی به شماره ۹۵۰۱۰ WMGW4 و مقاله حاضر مستخرج از آن، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

پی نوشت‌ها

1- Nash-Sutcliffe Efficiency

۶- مراجع

Afinowicz JD, Munster CL, Wilcox BP (2005) Modeling effects of brush management on the rangeland water budget: Edwards Plateau. Texas J Am Water Resour Assoc 41(1):181-193

Afrasyabian A (1998) The importance of Karst water resources research in Iran. Proceedings of the second World Water Resources Conference in Karst Formations, Kermanshah, Iran (In Persian)

Amatya DM, Jha MK, Edwards AE, Williams TM, Hitchcock DM (2011) SWAT based streamflow and embayment modeling of a karst affected Chapel Branch Watershed, SC. Trans ASABE 54(4):1311-1323

Amatya DM, Jha MK, Edwards AE, Williams TM, Hitchcock DM (2013) SWAT model prediction of phosphorus loading in a South Carolina Karst Watershed with a downstream embayment. Journal of Environmental Protection 4(1):75-90

Amin MG, Veith TL, Collick AS, Karsten HD, Buda AR (2017) Simulating hydrological and nonpoint source pollution processes in a karst watershed: A variable source area hydrology model evaluation. Agricultural Water Management 180(B):212-223

Anonymous (2011) Water budget of Tashk-Bakhtegan and Mahralu basin, Iran, Ministry of Energy, Iran.

شبیه‌سازی رواناب، تعیین عملکرد گیاهی و تبخیر و جریان پایه نشان دهنده دقت بالای مدل SWAT در برآورد این موارد است. رویکرد موجود در شبیه‌سازی حوضه‌های کارستی نیز توانست به خوبی رواناب سطحی و جریانات پایه را شبیه‌سازی کند و مقادیر نفوذ به آب زیرزمینی را بیشتر از مدل SWAT برآورد کرده است. مقادیر مؤلفه‌های بیلان به دست آمده از مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در برخی از موارد نظیر نفوذ و تبخیر و تعرق نشان داد که با مقادیر برآوردی بیلان کلیماتولوژی و گزارش‌های مطالعات جامع، تفاوت‌های زیادی دارد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

ثبت مقادیر واقعی مؤلفه‌های بیلان آبی در هیدرولوژی به ویژه در مناطق کارستی عملاً کاری دشوار و امکان‌ناپذیر است. بنابراین محققین و پژوهشگران همواره به دنبال یافتن راه‌حلی مناسب و دقیق هستند تا بتوانند برنامه‌های مدیریتی و سناریوهای مختلفی که برای آن‌ها اهمیت دارد را پی‌ریزی کنند. این پژوهش در حوضه آبریز کارستی دریاچه مهارلو در طی بازه ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۳ انجام شده است و طی آن به شبیه‌سازی حوضه با مدل SWAT-ML و SWAT در شبیه‌سازی حوضه آبریز کارستی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش، با بررسی رویکردهای مختلف شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز کارستی، نسبت به برآورد مقادیر نفوذ به آبخوان پرداخته شده است. رواناب سطحی، جریانات پایه، محصولات کشاورزی و تبخیر و تعرق واقعی در این مدل مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفتند و نتایج مناسبی را ارائه کردند.

مدل SWAT و مدل توسعه یافته در این پژوهش یعنی SWAT-ML برای شبیه‌سازی این حوضه آبریز مورد ارزیابی قرار گرفتند. تفاوت معناداری بین مدل توسعه یافته در این پژوهش با یکدیگر دیده نشد، اما مدل توسعه یافته در برآورد مقادیر نفوذ، رواناب سطحی و دبی پایه نتایج بهتری را ارائه کرد. مؤلفه‌های بیلان محاسبه شده در این

- streambeds of Cane Run Stream, Kentucky. *Journal of Hydrologic Engineering* 10(4):743-772
- Savenije HHG (2009) The art of hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences* 13(1):157-16
- Spruhill CA, Workan SR, Taraba JL (2000) Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Trans ASABE* 43(6):1431-1439
- Tian Y, Wang S, Bai X, Luo G, Xu Y (2016) Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China. *Science of the Total Environment* 566(11):1297-1308
- Vale M, Holman IP (2009) Understanding the hydrological functioning of a shallow lake system within a coastal karstic aquifer in Wales, UK. *Journal of Hydrology* 376(1-2):285-294
- Yactayo GA (2009) Modification of the SWAT model to simulate hydrologic processes in a karst-influenced watershed. M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA
- Arnold JG, Moriasi DN, Gassman PW, Abbaspour KC, White MJ, Srinivasan R (2012) Swat: model use, calibration, and validation. *Trans ASABE* 55(4):1491-508
- Baffaut C, Benson VW (2009) Modeling the flow and pollutant transport in a karst watershed with SWAT. *Trans ASABE* 52(2):469-479
- Ford DC (2007) Javan cvijic and the founding of karst geomorphology. *Environmental Geology* 51(5):220-368
- Malagò A, Efstathiou D, Bouraoui F, Nikolaidis P, Franchini M, Bidoglio G, Kritsotakis M (2016) Regional scale hydrologic modeling of a karst-dominant geomorphology: The case study of the Island of Crete. *Journal of Hydrology* 540(1):64-81
- Nikolaidis NP, Bouraoui F, Bidoglio G (2013) Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed. *Journal of Hydrology* 477(4):129-138
- Palanisamy B, Workman SR (2015) Hydrologic modeling of flow through sinkholes located in