



Primary Salinity Modeling Using a Semi-Distributed Hydrological Model

M. Rezaie¹, H. Alizadeh^{2*} and M. Ehtiat³

Abstract

Salinity of water resources is a common problem at many river basins all over the country. Helleh River Basin (HRB) with semi-arid climate located at south of Iran is one of such basins, where primary (natural) sources such as salt diapirs and salt formations are the main sources of salinity. This study deals with developing a basin-scale model for analysis of water resources salinity. The model consists of two modules of water balance and salt balance. SWAT model takes the role of water balance module and the salt balance module is developed in an external programming environment. It is worth mentioning that the original version of SWAT is not capable of modeling soil and water salinity. The model is applied to Shoor River, a highly saline river, located at upstream part of HRB and SUFI2 algorithm is utilized for model calibration and validation. Calibration is performed based on monthly records of discharge and TDS for the period of 1995-2000 at Shekastan hydrometric station on Shoor River. Calibration results showed that for the best parameters' estimation, goodness-of-fit measures of R-squared (R²) and Nash-Sutcliffe (NS) respectively were 0.76 and 0.73 for discharge and 0.63 and 0.56 for TDS. Also validation was based on the 2001-2003 observations where R² and NS related to the best estimation were obtained respectively as 0.81 and 0.71 for discharge and 0.81 and 0.65 for TDS. Results demonstrated the reliable performance of the model for analyzing river basin's water and salt regimes.

Keywords: Hydrologic Model, Semi-Distributed, SWAT, Primary Salinity, SUFI2.

Received: April 17, 2017

Accepted: June 10, 2017

مدل سازی شوری اولیه منابع آب با استفاده از یک مدل نیمه توزیعی هیدرولوژیکی

مجید رضایی^۱، حسین علیزاده^{۲*} و مجید احتیاط^۳

چکیده

رودخانه حله واقع در جنوب کشور در سالهای اخیر با چالش‌های متعددی در زمینه مدیریت آب و بطور خاص شوری مواجه بوده است. یکی از دلایل عمده شور شدن آب این رودخانه با حرکت از بالادست به پایین دست، شوری اولیه تحت تأثیر وجود سازندهای زمین شناختی شور و گنبد‌های نمکی در سطح حوضه است. با این توجه در این تحقیق یک ابزار تحلیلی برای مدل سازی شوری منابع آب در سطح حوضه آبریز رودخانه توسعه داده می شود و برای مدل سازی شوری اولیه در یکی از زیرحوضه‌های رودخانه حله بکار می رود. مدل مذکور از دو جزء بهم مرتبط بیلان آب و بیلان نمک تشکیل شده که برای بیلان آب از مدل شبیه سازی SWAT، که نسخه اصلی آن قادر به مدل سازی شوری منابع آب نیست، بهره برده و جزء بیلان نمک آن با استفاده از یک محیط برنامه نویسی خارجی توسعه می یابد. سپس، برای واسنجی مدل توسعه یافته، الگوریتم SUFI2 مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج واسنجی مدل بیلان آب-نمک بر اساس مشاهدات مربوط به سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ از کمیت‌های آبدهی و شوری (TDS) رودخانه در ایستگاه هیدرومتری شکستیان واقع بر رودخانه شور به صورت مقادیر R² و NS به ترتیب برابر ۰/۷۶ و ۰/۷۳ و برای آبدهی و ۰/۶۳ و ۰/۵۶ برای TDS به دست آمده است. همچنین نتایج اعتبارسنجی مبتنی بر مشاهدات مربوط به دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳ به صورت مقادیر R² و NS به ترتیب برابر با ۰/۸۱ و ۰/۷۱ برای آبدهی و ۰/۸۱ و ۰/۶۵ برای TDS، عملکرد مناسب مدل بیلان آب-نمک در شبیه سازی توأمان آبدهی و شوری رودخانه را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی، SWAT، شوری اولیه، SUFI2.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۳/۲۰

1- MSc. Student, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: alizadeh@iust.ac.ir

3-Assistant Professor, Technical and Engineering Department, Ardakan University, Ardakan, Iran

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان خرداد ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

امروزه شوری یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی حوضه‌های خشک و نیمه خشک به حساب می‌آید. در این مناطق که غالباً بخش عمده تقاضاهای آب برای مصارف کشاورزی است، مسأله شور شدن منابع آب و خاک به علت کیفیت نامطلوب آب آبیاری، میزان تبخیر و تعرق بالا، جنس خاک و غیره، به‌خصوص در مواردی که سطح آب زیرزمینی بالاست اهمیت دو چندان پیدا می‌کند (Biggs et al., 2013). بر اساس آمارهای جهانی تقریباً ۹۵۳ میلیون هکتار از زمین‌های کشت آبی جهان تحت تأثیر شوری قرار دارند و سالانه ۱۰ میلیون هکتار اراضی کشاورزی به‌خاطر شوری رها می‌شوند (Saysel and Barlas, 2001).

مشکلات شوری به دلایل مختلفی اتفاق می‌افتد که تمام این عوامل را در دو دسته کلی شوری اولیه (منشأهای طبیعی، گنبد‌های نمکی و سازندهای شور) و شوری ثانویه (اقدامات مدیریتی انسان) می‌توان تقسیم‌بندی نمود. شوری اولیه به‌صورت طبیعی در خاک‌ها و آب‌ها رخ می‌دهد. شوری ثانویه ناشی از فعالیت‌های انسانی است. اغلب، تفاوت‌گذاری میان شوری اولیه و شوری ثانویه مشکل است؛ چرا که شوری ثانویه معمولاً شوری اولیه‌ای است که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی تشدید شده است. شواهد قابل توجهی وجود دارد که نشان می‌دهد بسیاری از مناطقی که در حال حاضر دارای علائم شوری ثانویه هستند در گذشته تحت تأثیر شوری اولیه قرار داشته‌اند (Cai et al., 2003). شوری اولیه در مناطق به‌طور طبیعی شور شده، خاک‌های شور و به‌دلیل عبور آب از سنگ‌های شور پدید می‌آید. به دلیل صعود موینگی، آب همراه با نمک‌ها به لایه‌های بالایی خاک صعود کرده و پس از تبخیر آب، نمک رسوب می‌کند. دریاچه‌های شور، برکه‌های شور، باتلاق‌های شور و دشت‌های شور نمونه‌هایی از مناطق به‌طور طبیعی شور شده هستند. شوری اولیه پدیده‌ای بلند مدت است و زمین‌هایی که تحت تأثیر این پدیده قرار گرفته‌اند معمولاً به‌شدت شور هستند و به آسانی اصلاح نمی‌شوند (Vengosh, 2003).

در دو دهه اخیر کنترل شوری اولیه از طریق اقدامات اکولوژیک مانند کاشت پوشش گیاهی با ریشه‌های عمیق و یا از طریق اقدامات مهندسی مانند جداسازی آبهای بسیار شور، مورد توجه قرار گرفته است. بررسی اثرات این اقدامات با هدف دستیابی به بهترین گزینه‌های مدیریتی نیازمند به‌کارگیری ابزارهایی تحلیلی است؛ به‌طوری‌که بتوانند فرآیندهای طبیعی شورکننده را مدل‌سازی کنند. در این بین مدل‌های منابع آب و خاک بیشتر با هدف بررسی و مدل‌سازی شوری ثانویه توسعه یافته‌اند و می‌توان گفت مدل‌هایی که بتوانند فرآیندهای طبیعی

مربوط به شوری را در سطح حوضه آبریز مدل‌سازی کنند نادر اند. یکی از مدل‌هایی که امروزه برای مدل‌سازی فرآیندهای طبیعی و اثرات اقدامات مدیریتی در سطح حوضه آبریز بطور گسترده در سرتاسر جهان به‌کار می‌رود مدل SWAT است. هر چند که SWAT در درون خود مجهز به امکان مدل‌سازی شوری نیست، در برخی از مطالعات محدود از آن در کنار مدل‌های بیلان نمک برای این نوع مدل‌سازی استفاده شده است. در این بین تحقیقاتی که از SWAT برای شبیه‌سازی شوری اولیه استفاده می‌کنند بسیار محدود و البته ساده انگارانه هستند. در ادامه به این تحقیقات اندک اشاره می‌شود.

(Gikas et al., 2009) به منظور بررسی اثرات عواملی از قبیل هیدرودینامیک و شوری بر شکل‌گیری و بازگشت اتریفیکاسیون در تالاب Vistonis واقع در شمال یونان برای شبیه‌سازی پدیده‌های کمی و کیفی تالاب از مدل WASP5 استفاده کردند. آن‌ها در این تحقیق برای تخمین بار رسوب و نیترات منتقل شده به تالاب از مدل SWAT بهره بردند. (Somura et al., 2009) با هدف ارزیابی اثرات سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر تغییرات تبخیر و تعرق، تغذیه آب زیرزمینی، بیلان آب برف، شوری دریاچه و در نهایت حیات آبریزان در حوضه آبریز رودخانه Hii کشور ژاپن از مدل SWAT برای مدل‌سازی بیلان آب و از رگرسیون برای مدل‌سازی رابطه بین آبدی رودخانه و شوری دریاچه استفاده کردند و در نهایت نتیجه گرفتند که حداکثر غلظت شوری تحت تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی تأثیری جدی بر زندگی آبریزان نخواهد داشت. (Piman et al., 2013) برای بررسی اثرات بالقوه ناشی از سناریوهای مختلف توسعه زیرساخت‌های منابع آب طی افق‌های آینده بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی از جمله رژیم جریان، سیل‌خیزی و نفوذ شوری در حوضه آبریز Mekong واقع در جنوب شرق آسیا از ترکیب مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان و مدل‌های IQQM و ISIS برای شبیه‌سازی شوری استفاده کردند. (Mittelstet et al., 2015) با هدف ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر شوری و پیامدهای شوری بر بازدهی و رشد محصولات در حوضه آبریز رودخانه North Fork واقع در آمریکا از مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان و از معادلات رگرسیونی ساده برای شبیه‌سازی شوری استفاده کردند.

با مرور مطالعات گذشته می‌توان دریافت که عمده کارهای گذشته در زمینه به‌کارگیری مدل نیمه‌توزیعی SWAT برای شبیه‌سازی شوری و تحلیل مسائل مربوط به آن به این صورت بوده که یا در کنار این مدل از روابط ساده رگرسیونی بصورت رابطه دی- شوری استفاده شده و یا اینکه مدل SWAT در تلفیق با مدل‌های دیگر همچون IQQM

که قادر به شبیه‌سازی شوری‌اند بکار گرفته شده است. از طرف دیگر، از آنجا که شوری بر طبق تعریف با عناصر متعدد شیمیایی شامل آنیون‌ها و کاتیون‌ها در ارتباط است و همچنین با توجه به اینکه مدل‌سازی فرآیندهای حاکم بر تک تک این عناصر و همچنین اندرکنش بین آنها دشوار است و بدلیل آنکه تأثیر حاصل جمعی این عناصر بر فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی در سیستم‌های منابع آب مهمتر است، بسیاری از مدل‌سازی‌های بزرگ مقیاس منابع آب، شوری را به صورت مجموع جامدات محلول در نظر گرفته و با استفاده از مدل‌های بیلانی ساده به روندیابی شوری و حرکت مواد محلول پرداخته‌اند و در این زمینه مدل‌هایی هم توسعه یافته است. از آنجا که شوری علاوه بر عوامل سطحی همچون گنبد‌های نمکی و اقدامات انسان عمدتاً در کشاورزی، با عوامل زمین‌شناختی همچون سازندهای شور در ارتباط است، در مدل SWAT علی‌رغم آنکه فرآیندهای مختلف کمی هیدرولوژیکی و همچنین تعداد قابل توجهی از پارامترهای کیفی آب قابل مدل‌سازی‌اند، در حال حاضر امکان مدل‌سازی شوری آب و خاک مبتنی بر فرآیندهای مربوطه فراهم نیست. با این توجه در این پژوهش یک روش مدل‌سازی مبتنی بر فیزیک برای شوری اولیه (طبیعی) حوضه آبریز در قالب مدل SWAT ارائه می‌شود. رودخانه شور که جزو سیستم رودخانه حله است و البته تحت تأثیر برداشت‌های انسانی نیست به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید.

در ادامه در بخش دوم در ضمن معرفی منطقه مورد مطالعه به بخشی از انگیزه‌های این تحقیق و بیان مسأله در چارچوب یک مسأله کاربردی مرتبط با مدیریت آب پرداخته خواهد شد. سپس در بخش سوم مقاله، جزئیات روش‌شناسی تحقیق مطرح می‌شود و نتایج به همراه بحث در بخش چهارم ارائه خواهد شد و در پایان در بخش پنجم مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهد آمد.

۲- منطقه مورد مطالعه

متأسفانه مشکل شوری در کشور ما همراه با مشکل کم آبی است و در کنار محدودیت کمی منابع آب، کیفیت این منابع محدود نیز در اثر شوری کاهش یافته و در مجموع سبب کاهش یافتن منابع قابل استفاده می‌شود. با توجه به کمبود منابع آب دارای کیفیت مناسب در حوضه‌های آبریز واقع در مناطق خشک و نیمه خشک جنوبی کشور، لازم است این منابع به‌صورت بهینه مورد استفاده قرار گیرند و عوامل کاهنده کیفیت آب شناسایی و کنترل شوند. مهم‌ترین عامل کاهنده کیفیت آب در این حوضه‌های آبریز شور شدن آب به‌صورت طبیعی و یا تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی است.

حوضه آبریز حله یکی از حوضه‌های آبریز مهم کشور است که با مشکل شوری مواجه است. این حوضه از نظر تقسیمات کشوری در دو استان فارس و بوشهر واقع شده است و اقلیمی خشک و نیمه خشک دارد. عمده مصرف آب در این حوضه مربوط به بخش کشاورزی است. رودخانه حله از اتصال دو رودخانه اصلی شاپور و دالکی تشکیل شده است که نهایتاً به خلیج فارس منتهی می‌گردد. به واسطه وجود گنبد‌های نمکی در مسیر جریانات سطحی، سازندهای شور کننده گچساران و میشان، ساختارهای زمین‌شناسی شورکننده در بستر رودخانه و همچنین اتصال برخی جریانات فرعی غلیظ (رودخانه شور و چشمه‌های آهکی) در بخش‌های قابل توجهی آب رودخانه‌های اصلی آن شور و همچنین با حرکت از بالادست به سمت پایین دست شوری رودخانه افزایش یافته و کیفیت آب نیز به تدریج کاهش می‌یابد. بنابراین به‌منظور استفاده صحیح از منابع آب، شناخت کامل از پتانسیل‌های آبی موجود و ارزیابی‌های توأمان کمیت و کیفیت آب ضروری به‌نظر می‌رسد.

رودخانه شاپور، که یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه حله است، در مسیر خود به‌علت پیوستن جریانات فرعی شور می‌شود؛ در این بین مهم‌ترین این جریانات فرعی غلیظ، به نام رودخانه شور شناخته می‌شود که آب آن بسیار شور است (Abgir, 2014). موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز رودخانه حله (نقشه قرمز رنگ) در نقشه ایران در شکل ۱ نشان داده شده است. حوضه آبریز رودخانه شور از زیر حوضه‌های حوضه آبریز حله است که با وسعتی برابر ۶۴۱ کیلومتر مربع در قسمت شمال شرقی رودخانه شاپور واقع شده است که پس از ایستگاه بوشیگان به رودخانه شاپور ملحق می‌شود. سطح حوضه آبریز رودخانه شور را گیاهانی نظیر درختچه‌های گز و بادام کوهی و بوته‌های علفی پوشانده است. از نظر زمین‌شناسی سازندهایی که در این حوزه مشاهده می‌شوند عبارتند از: آهک‌های آسماری با رخنمون ۵۱ کیلومتر مربع (۸٪ سطح حوضه)، کنگلومرای بختیاری با ۳/۵ کیلومتر مربع (۰/۵ درصد)، سازند میشان با ۸۷/۳ کیلومتر مربع (۱۳/۶ درصد)، سازند گچساران با ۴۶۷ کیلومتر مربع (۷۲/۸ درصد)، سازند آغاچاری با ۱۱/۵ کیلومتر مربع (۱/۸ درصد) و آبرفت‌های بستر رودخانه با ۲۱ کیلومتر مربع (۳/۳ درصد). بنابراین، سازند گچساران، که عمده لایه‌های زمین‌شناختی حوضه رودخانه شور را تشکیل داده و جزو سازندهای شور به حساب می‌آید، یکی از مهم‌ترین عوامل شور شدن این رودخانه است. سازندهای دیگر مانند میشان و آغاچاری هم کلاً به‌علت داشتن رسوبات تبخیری جزء سازندهای محدود کننده محسوب می‌شوند. در نتیجه می‌توان گفت که بیش از ۹۰ درصد منطقه از سازندهای شوری‌زا تشکیل شده است. با توجه به ناچیز بودن برداشت آب در حوضه

۳- روش شناسی

کلید روش شناسی تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، از یک مدل مبتنی بر فرآیند به صورت بیلان آب- نمک استفاده می‌شود و برای واسنجی پارامترهای مدل و اعتبارسنجی مدل از الگوریتم مبتنی بر عدم قطعیت SUFI2 استفاده می‌گردد. در ادامه هر یک از اجزاء روش شناسی تشریح می‌شود.

۳-۱- مدل بیلان آب- نمک

در این بخش توضیحات بیشتر در مورد مدل بیلان آب- نمک ارائه می‌شود. مدل از دو جزء مهم (یا ماجول) ۱- بیلان آب برای روندیابی حرکت آب در سطح خشکی حوضه آبریز و همچنین درون رودخانه‌ها و مخازن و ۲- بیلان نمک برای روندیابی شوری آب درون رودخانه که با هم در ارتباطند، تشکیل شده است. این ارتباط به صورت یکسویه بوده بطوریکه برخی از خروجی‌های مهم ماجول بیلان آب (سری زمانی مؤلفه های ورودی به رودخانه) به عنوان ورودی ماجول بیلان نمک بکار می‌آید. ماجول بیلان آب دقیقاً همان مدل SWAT است. ماجول بیلان نمک بر مبنای برخی معادلات بیلانی ساده در محیط نرم افزار MATLAB برنامه نویسی و اجرا می‌شود. در ادامه جزئیات بیشتری در مورد هر یک از اجزاء مدل بیلان آب- نمک ارائه می‌شود.

۳-۱-۱- ماجول بیلان آب

همانطور که بیان شد، ماجول بیلان آب در اینجا مدل SWAT است. مدل SWAT به منظور شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه آبریز و ارزیابی اثرات اقدامات مربوط به مدیریت آب، کشاورزی و منابع طبیعی توسعه یافته است.

رودخانه شور می‌توان گفت عوامل شور کننده این رودخانه در دسته شوری طبیعی (اولیه) قرار می‌گیرند. موقعیت حوضه آبریز رودخانه شور در شکل ۱ قابل مشاهده است.

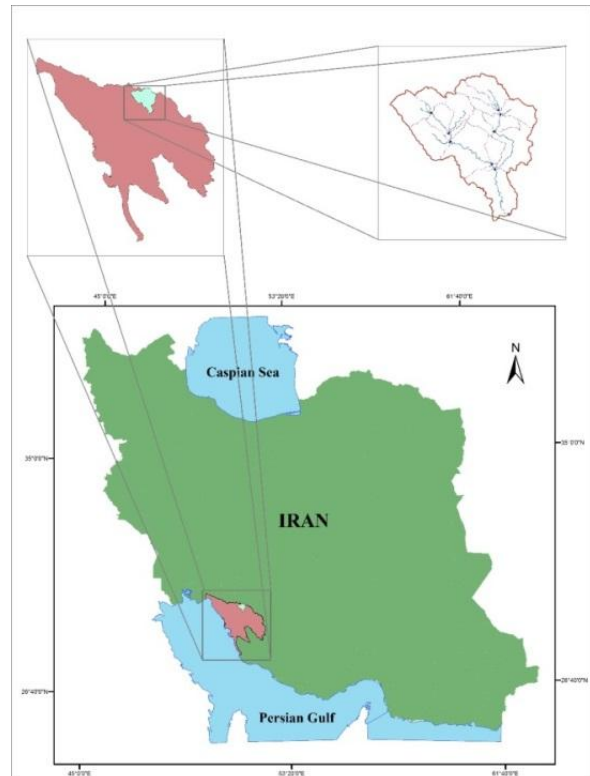


Fig. 1- Location of the study area; Helleh River Basin (left) and Shoor River Catchment (right)
 شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ شکل سمت چپ بالا مربوط به حوضه آبریز رودخانه حله و شکل سمت راست بالا مربوط به حوضه آبریز رودخانه شور است.

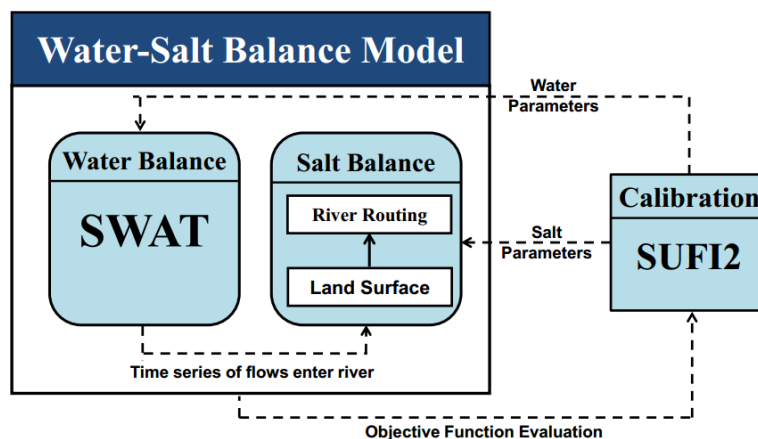


Fig. 2- Schematic of the methodology
 شکل ۲- طرح کلی روش شناسی تحقیق

رودخانه $Q_{surf,t}$ ، سری زمانی جریان عرضی منتهی به رودخانه از منطقه ریشه $Q_{lat,t}$ و سری زمانی جریان برگشتی (جریان پایه) به رودخانه از آبخوان کم عمق $Q_{gw,t}$.

۳-۱-۲- ماجول بیلان نمک

همانطور که در شکل ۲ مشاهده شد، ماجول بیلان نمک ۲ جز اصلی دارد. جز اول، یعنی سطح خشکی حوضه، مربوط می‌شود به شبیه‌سازی آورد نمک از سطح حوضه به آبراهه رودخانه. جزء دوم، یعنی روندیابی رودخانه، مربوط می‌شود به روندیابی نمک درون رودخانه از بالادست به پایین دست با در نظر گرفتن اثر الحاق شاخه‌های فرعی به اصلی رودخانه. محاسبات بیلان نمک در محیط نرم‌افزار MATLAB برنامه نویسی و اجرا می‌شود؛ بدین صورت که در محیط MATLAB ماجول بیلان آب (مدل SWAT) فراخوانی و اجرا شده و فایل‌های متنی خروجی آن خوانده شده و به اطلاعات مورد نیاز استخراج شده و به عنوان ورودی بیلان نمک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه این بخش از مقاله توضیحات بیشتری در مورد هر یک از دو جزء ماجول بیلان نمک ارائه می‌شود.

در جزء اول، یعنی بیلان نمک سطح خشکی حوضه، اثر آورد نمک به رودخانه از طریق سه مؤلفه مهم رواناب سطحی، جریان عرضی برگشتی از منطقه ریشه و غیر اشباع و جریان برگشتی از آب زیرزمینی (جریان پایه) به صورت رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$C_{st,t} = \frac{Q_{surf,t}C_{surf,t} + Q_{lat,t}C_{lat,t} + Q_{gw,t}C_{gw,t}}{Q_{surf,t} + Q_{lat,t} + Q_{gw,t}} \quad (1)$$

که در آن، $C_{st,t}$ غلظت نمک رودخانه (mg/l)، $Q_{surf,t}$ دبی رواناب سطحی (m^3/s)، $C_{surf,t}$ غلظت نمک رواناب سطحی (mg/l)، $Q_{lat,t}$ دبی جریان عرضی (m^3/s)، $C_{lat,t}$ غلظت نمک جریان عرضی (mg/l)، $Q_{gw,t}$ دبی آب زیرزمینی (m^3/s) و $C_{gw,t}$ غلظت نمک آب زیرزمینی (mg/l) در گام زمانی t -ام است. همانطور که پیش‌تر بیان شد متغیرهای $Q_{surf,t}$ ، $Q_{lat,t}$ و $Q_{gw,t}$ از ماجول بیلان آب (مدل SWAT) بدست می‌آیند.

یک فرض ساده‌کننده مهم در این بخش آن است که برای مؤلفه‌های آورد به رودخانه غلظت نمک به صورت ایستا یا ثابت با زمان در نظر گرفته شده است. بنابراین جملات مربوط به غلظت نمک ثابت با زمان در نظر گرفته می‌شوند و به عبارت دیگر پارامترهای ماجول بیلان نمک‌اند. از آنجا که جرم نمک مربوط به هر مؤلفه جریان آب از حاصل ضرب غلظت نمک در حجم آب آن مؤلفه بدست می‌آید، بنابراین

برای مدل‌سازی نیمه‌توزیعی و در نظر گرفتن اثرات ناهمگونی مکانی در SWAT، در ابتدا لازم است حوضه آبریز به واحدهای کوچکتر به نام واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم شود و در مدل هر HRU به صورت توده‌ای در نظر گرفته می‌شود. HRU-ها که با توجه به توپوگرافی، خاک و کاربری اراضی تعیین می‌شوند، با هم در ارتباط‌اند، به این صورت که خروجی آنها که مربوط می‌شود به جریان آب و یا مواد محلول در آب به آبراهه رودخانه منتهی می‌شود و در نهایت به تدریج از بالادست به پایین دست، این جریانها با هم تجمع می‌شوند. بنابراین محاسبات هیدرولوژیکی در هر گام زمانی از HRU-ها آغاز می‌شود و متغیرهای مختلف هیدرولوژیکی از قبیل نفوذ، رواناب سطحی، رطوبت خاک، جریان افقی، نفوذ عمقی، جریان زیرزمینی، هد و ذخیره آبخوان، مقدار پارامترهای کیفی آب و خاک، رشد گیاهان، و هر گونه اقدام مدیریتی از قبیل آبیاری و غیره برای آن شبیه‌سازی و تعیین می‌گردد. سپس در سطح زیرحوضه (هر زیرحوضه از چند HRU تشکیل می‌شود) متغیرهای مربوط به جریان آب و مواد محلول با هم جمع می‌شوند و مبتنی بر آن جریان آب و مواد محلول در آبراهه رودخانه‌ها و مخازن تا رسیدن به خروجی حوضه روندیابی می‌گردند. با این توضیحات می‌توان گفت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی یک حوضه آبریز درون SWAT در دو بخش یا سطح اصلی انجام می‌شود:

- بخش اول به صورت شبیه‌سازی سطح خشکی حوضه آبریز است که مربوط می‌شود به پدیده‌های مرتبط با جریان و ذخیره آب و مواد محلول بر روی خاک و درون لایه‌های خاک که در سطح واحدهای مکانی HRU و زیرحوضه انجام می‌شود؛
- بخش دوم مربوط به روندیابی آب و مواد محلول در رودخانه‌ها و مخازن است.

در مدل SWAT، آب در هر HRU، به وسیله چهار حجم ذخیره شامل برف، رطوبت منطقه ریشه و ناحیه غیر اشباع خاک (عمق ۲-۰ متر)، آبخوان سطحی آزاد (معمولاً ۲۰-۲ متر) و آبخوان عمیق تحت فشار ذخیره می‌شود. شبیه‌سازی جریان آب و مواد محلول مبتنی است بر معادلات ساده بیلان. برای آشنایی با جزئیات بیشتر از روش‌ها و معادلات مورد استفاده در مدل SWAT خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند به مرجع فنی مدل (Neitsch et al., 2009) رجوع نمایند.

در نهایت آنچه در این تحقیق از خروجی‌های مدل بیلان آب به عنوان ورودی ماجول بیلان نمک استفاده می‌شود سه مؤلفه مهم است که برای هر زیرحوضه به صورت جداگانه باید بین دو ماجول تبادل شوند. این مؤلفه‌ها عبارت‌اند از: سری زمانی رواناب سطحی منتهی به

ماهیت غیرایستای نمک در این نحوه مدل‌سازی تنها تحت تأثیر تغییرات زمانی و غیرایستا بودن مؤلفه‌های بیلان آب بوده و البته این فرض ساده‌کننده مهمی است. ضرورت لحاظ نمودن این فرض ساده‌کننده و رویکرد در مدل‌سازی بدین واسطه است که در این تحقیق مکانیزم‌های انحلال و ترسیب مربوط به نمک در سطح خشکی حوضه آبریز مورد توجه نبوده و البته مدل‌سازی آنها با پیچیدگی‌های قابل توجهی روبروست که در آینده می‌توان مدل را در این زمینه توسعه داد. به عبارت دیگر در اینجا فرض شده است که غلظت نمک فقط در سطح یک زیر حوضه ثابت است و تنها از یک زیرحوضه به زیرحوضه دیگر تغییر می‌کند و همانطور که در ارتباط با جزء دوم ماجول بیلان نمک توضیح داده می‌شود، معادلات بیلان نمک صرفاً در محل الحاق دو یا چند زیرحوضه (یا همان زیرشاخه‌های رودخانه) و تشکیل یک حوضه (شاخه) بزرگتر در نظر گرفته می‌شود.

در جزء دوم ماجول بیلان نمک، محل تلاقی شاخه‌های فرعی رودخانه به شاخه اصلی به صورت یک گره در نظر گرفته می‌شود که دارای یالهای ورودی و خروجی است. یالهای ورودی مربوط می‌شود به شاخه اصلی و فرعی ورودی به محل تلاقی و تنها یال خروجی شاخه اصلی خروجی از محل تلاقی است. با فرض پایدار بودن نمک و مبتنی بر بیلان جرم نمک می‌توان غلظت نمک در جریان خروجی را بصورت زیر بدست آورد:

$$C_{out,t} = \frac{\sum_i Q_{i,t} C_{i,t}}{Q_{out,t}} \quad (2)$$

که در آن $C_{out,t}$ غلظت نمک شاخه خروجی اصلی و $Q_{out,t}$ دبی جریان شاخه خروجی اصلی، $Q_{i,t}$ دبی جریان شاخه ورودی i -ام و $C_{i,t}$ غلظت نمک شاخه ورودی i -ام همگی در گام زمانی t -ام است.

۳-۲- الگوریتم SUFI2

SUFI2 یک روش مبتنی بر عدم قطعیت برای واسنجی مدل‌ها است که اولین بار در موضوع منابع آب و محیط زیست ارائه شده و بکار رفته است (Abbaspour et al., 2007). این روش از نمونه‌گیری استفاده نموده و دارای یک چارچوب بیزی است. در SUFI2 هر پارامتر به صورت یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت در نظر گرفته می‌شود و بنابراین مقدار هر پارامتر در یک بازه محدود از مقادیر می‌تواند باشد که باید در ابتدای کار این بازه تعیین شود و با پیشرفت الگوریتم اندازه این بازه معمولاً کوچکتر می‌شود و بنابراین در نهایت تخمین‌های بازه‌ای از مقادیر پارامترها فراهم می‌آید. برای نمونه‌گیری از فضای پارامترها در SUFI2 از روش Latin Hypercube استفاده می‌شود و در نتیجه به‌کارگیری آن تعداد زیادی از ترکیبات مقادیر پارامترها تولید می‌شود و مقدار تابع هدف که نماینده میزان اختلاف محاسبات مدل با

مشاهدات است به ازای هر ترکیب محاسبه می‌شود و برخی عملیات ماتریسی مبتنی بر تئوری رگرسیون غیرخطی ماتریس کواریانس پارامترها محاسبه شده و در نهایت بازه تغییرات هر پارامتر تدقیق می‌شود.

می‌توان روندی که در بالا توضیح داده شد را چندین بار انجام داد و در هر مرحله بازه تغییرات مقادیر پارامترها از مرحله قبل بدست می‌آید. با انجام مکرر این روند (معمولاً بین ۴ تا ۵ بار) و تدقیق بازه‌های مقادیر پارامترها، نتایج شبیه‌سازی سری‌های زمانی به نحوی خواهد بود که اعداد مشاهداتی که خارج از محدوده 95PPU شبیه‌سازی است، افزایش می‌یابد. 95PPU ناحیه‌ای است که در برگزیده ۹۵٪ نتایج شبیه‌سازی است و هر چه بازه تغییرات پارامترها کاهش یابد، انتظار می‌رود که ناحیه 95PPU نیز فشرده‌تر شود. تعداد نقاط موجود در ناحیه 95PPU که نشان دهنده شمول نتایج مدل بر مشاهدات و یا به عبارتی کیفیت نتایج مدل است، توسط شاخصی به نام p-factor و دقت بازه‌های تغییرات پارامترها توسط شاخصی به نام d-factor کمی می‌شوند. p-factor به صورت نسبت تعداد مشاهدات قرار گرفته در ناحیه 95PPU به کل مشاهدات تعریف می‌شود. همچنین d-factor به صورت میانگین پهنای ناحیه 95PPU به انحراف معیار مشاهدات تعریف می‌شود. هرچه مقدار p-factor بیشتر و هرچه مقدار d-factor کمتر باشد، در نهایت مطلوب‌تر است. بنابراین در طی روند پیشرفت الگوریتم SUFI-2، یک تعامل بین مقادیر شاخص‌های d- و p-factor وجود خواهد داشت به طوری که در ابتدا مقادیر d-factor و p-factor بزرگتر است و به تدریج و در مراحل بعدی الگوریتم، مقدار آنها کاهش می‌یابد. هرچه مقدار d-factor به صفر، مقدار p-factor به ۱ نزدیک‌تر باشد، نتایج کالیبراسیون مدل بهتر خواهد بود. با مشاهده و مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی، حدود پارامترها را در جهت بهبود تابع هدف تغییر داده و یا اصلاح می‌کنیم. این روند هرچند نیازمند شناخت از پارامترها و نحوه تأثیرگذاری آنها بر تابع هدف است، ولی این مزیت را دارد که فرایند واسنجی در اختیار تحلیل‌گر است و زمان واسنجی را بهینه می‌کند. در این تحقیق محیط برنامه‌نویسی MATLAB برای کدنویسی الگوریتم SUFI2 انتخاب گردید.

پس از انجام واسنجی مدل بیلان آب- نمک با استفاده از الگوریتم SUFI2 مبتنی بر مشاهدات دوره زمانی مشخص و دستیابی به تخمین‌های بازه‌ای و نقطه‌ای مناسب از مقادیر پارامترهای مهم، اعتبارسنجی کارایی مدل مبتنی بر مشاهدات یک دوره زمانی متفاوت انجام می‌شود.

۳-۳- ملاحظات کاربرد مدل

در این مطالعه برای ساخت مدل هیدرولوژیکی از مدل ArcSWAT در محیط ArcGIS 10.1 استفاده شد. داده‌های مورد استفاده برای ساخت مدل SWAT و اطلاعات کلی در مورد منابع نقشه‌های ورودی مدل به شرح ذیل هستند:

- نقشه کاربری اراضی (منطقه مورد مطالعه را دو نوع پوشش گیاهی، بوته‌های علفی (شماره ۲) و درختچه‌های گز (شماره ۷)، پوشیده است)؛ از شرکت مدیریت منابع آب ایران با دقت ۱۰۰ متر مطابق شکل ۳؛
- نقشه خاک (منطقه مورد مطالعه از یک نوع خاک، شن-لوم، تشکیل شده است)؛ از سایت FAO (1995) مطابق شکل ۳؛
- نقشه توپوگرافی؛ از شرکت مدیریت منابع آب ایران با دقت ۳۰ متر مطابق شکل ۳؛

● داده‌های هواشناسی؛ از داده‌های هواشناسی بازتحلیل شده حاصل پروژه CFSR سازمان NCEP، شامل بارش روزانه، حداقل و حداکثر دما برای یک دوره ۱۱ ساله (۱۹۹۳-۲۰۰۳)؛

در این تحقیق برای محاسبه پتانسیل تبخیر تفرق از روش Hargreaves، برای محاسبه رواناب از روش SCS و برای روندیابی جریان از روش ذخیره متغیر، که همگی در مدل SWAT وجود دارند، استفاده شده است. تعیین حداقل مساحت زیرحوضه‌ها بر عهده مدل SWAT گذاشته شد تا با توجه به تغییرات ارتفاعی، میزان بهینه تعداد زیرحوضه‌ها را تعیین کند. همچنین مسیر جریان آبراهه‌های اصلی و فرعی توسط مدل SWAT، از روی نقشه DEM شناسایی و به مدل اضافه گردید. با تعیین حدود لازم برای ساخت زیرحوضه‌ها و HRUها، حوضه آبریز رودخانه شور به ۱۷ زیرحوضه و ۴۱ HRU تقسیم شد. در شکل ۴ آبراهه‌ها و زیرحوضه‌های حوضه آبریز رودخانه شور قابل مشاهده است.

۴- نتایج و بحث

برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل از مشاهدات توأمان دبی و غلظت کل جامدات محلول در ایستگاه شکستیان واقع بر روی رودخانه شور استفاده شد. با توجه به محدودیت داده‌های منظم و پیوسته در این رابطه، شبیه‌سازی برای دوره سال‌های ۱۹۹۳ الی ۲۰۰۳ میلادی و به صورت ماهانه انجام گرفت.

با توجه به تعدد پارامترهای مدل و عدم امکان تخمین تمامی پارامترها، بر مبنای تحلیل حساسیت اولیه و قبل از واسنجی باید مهم‌ترین پارامترهای مدل تعیین شوند تا در ادامه در روند واسنجی، مقدار آنها تخمین زده شود.

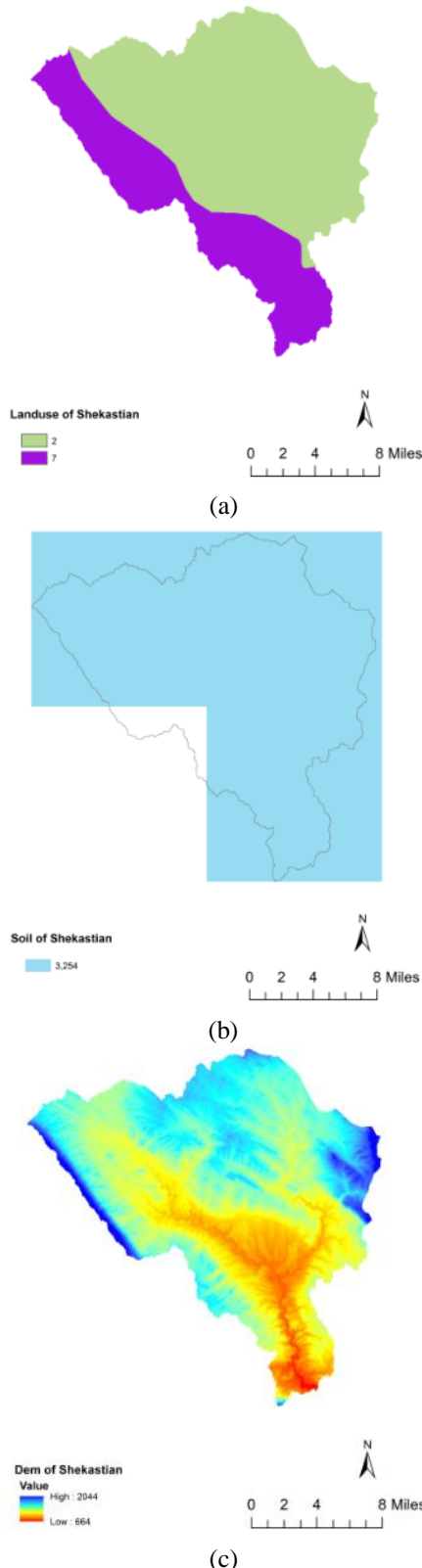


Fig. 3- Maps of Shoor Catchment: a) land use land cover, b) soil, and c) DEM
شکل ۳- نقشه‌های حوضه رودخانه شور: الف) کاربری اراضی، ب) خاک، ج) مدل رقومی ارتفاع

۳ پارامتر تعریف شد و در مجموع ۵۱ پارامتر برای واسنجی مدل در این ماجول در نظر گرفته شده است. از جهت رعایت اختصار و برای نمونه، فهرست و مشخصات پارامترهای شوری مربوط به برخی از زیرحوضه‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است. همانطور که در جدول‌های اشاره شده قابل مشاهده است، پارامترهای منتخب عمدتاً نشان‌دهنده و بازگوکننده خصوصیات حوضه آبریز (شیب، پوشش گیاهی و خاک)، عوامل تأثیرگذار بر جریان‌های سطحی و زیرزمینی، بیلان آب در منطقه غیراشباع، جریان در آبراهه‌های رودخانه، و غلظت نمک در آبهای سطحی و زیرسطحی می‌باشد.

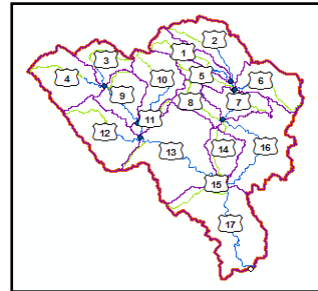


Fig. 4- Channels and sub-catchments of Shoor River
 شکل ۴- آبراهه‌ها و زیرحوضه‌های رودخانه شور

فرایند واسنجی برای دبی جریان خروجی و غلظت کل جامدات محلول از ایستگاه شکستیان برای سال‌های ۱۹۹۵ الی ۲۰۰۰ میلادی در گام زمانی ماهانه انجام شد. در این ایستگاه علی‌رغم اینکه دبی جریان به صورت روزانه اندازه‌گیری شده است، اما غلظت کل جامدات محلول فقط یک‌بار در ماه در کنار دبی لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌شود؛ به دلیل محدودیت مشاهدات، مقادیر مشاهدات غلظت کل جامدات محلول در هر ماه به عنوان نماینده آن ماه در نظر گرفته شد و بنابراین واسنجی مدل از جهت شوری در ایستگاه شکستیان مبتنی بر این داده‌ها است. البته در مورد مشاهدات دبی، میانگین ماهانه مربوط به مشاهدات روزانه دبی در نظر گرفته شد. برای اعتبارسنجی از مشاهدات دبی و غلظت در دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۱ الی ۲۰۰۳ میلادی استفاده گردید. نتایج تخمین مقادیر پارامترهای مدل تحت عنوان محدوده نهایی پارامترها در جدول ۱ و جدول ۲ قابل مشاهده است.

شایان ذکر است که میزان حساسیت پارامترهای مؤثر بر دبی جریان در حوضه‌های مختلف وابسته است به خصوصیات هر حوضه و دقت داده‌های ورودی به مدل (Rouholahnejad et al., 2014). با توجه به پیشنهادات مطالعات پیشین در زمینه پارامترهای حساس مدل SWAT، ۳۵ پارامتر حساس برای شبیه‌سازی دبی در ابتدا تعیین شدند و پس از انجام تحلیل حساسیت ۲۱ پارامتر انتخاب شدند که باید در واسنجی مقدار آنها تخمین زده شود. شایان ذکر است که برای تحلیل حساسیت، مدل ۳۰ بار به ازای ترکیب‌های مختلف از پارامترهای مدل (شامل هر دو جزء بیلان آب و نمک به صورت توأمان) اجرا گردید و پارامترهای با حساسیت بالا با استفاده از معیارهای آماری p-value و t-state تعیین گردیدند و ادامه روند واسنجی با این پارامترها ادامه یافت. هرچه مقادیر مطلق t-state بیشتر و مقدار p-value کمتر باشند پارامتر مد نظر حساسیت بیشتری از سایر پارامترها خواهد داشت. فهرست و مشخصات پارامترهای منتخب مربوط به آبدی در جدول ۱ قابل مشاهده است. همچنین برای بیلان نمک، به‌ازای هر زیرحوضه

Table 1- Properties and calibrated values of parameters of water balance module

جدول ۱- مقادیر واسنجی شده و مشخصات پارامترهای ماجول بیلان آب

Parameters	Description	Initial interval	Final interval
v__CN2.mgt	SCS curve number related to moisture condition II	20 - 90	50 - 69
v__ALPHA_BF.gw	Base flow recession constant	0 - 1	0.45 - 1
v__GW_DELAY.gw	Delay time for aquifer recharge (days)	0 - 500	198 - 500
v__GWQMN.gw	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm H ₂ O)	0 - 5000	2378 - 5000
v__SLSUBBSN.hru	Slope length (m)	10 - 150	50 - 129
v__RCHRG_DP.gw	Aquifer percolation coefficient	0 - 1	0 - 0.63
v__REVAPMN.gw	Threshold water level in shallow aquifer for revap* (mm H ₂ O)	0 - 500	0 - 308
v__EPCO.hru	Plant uptake compensation factor	0 - 1	0 - 0.66
v__GW_REVAP.gw	Revap coefficient	0.02 - 0.2	0.02 - 0.11
v__ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	0 - 1	0.41 - 1
v__SURLAG.bsn	Surface runoff lag coefficient (days)	1 - 24	7.2 - 20
r__SOL_K(1).sol	Saturated hydraulic conductivity of the first layer (mm/hr)	-0.8 - 1	-0.5 - 0.4
r__SOL_BD(1).sol	Moisture bulk density (Mg/m ³)	-0.5 - 0.6	-0.19 - 0.54
r__SOL_AWC(1).sol	Available water capacity	-0.02 - 0.4	0.01 - 0.33
r__SLSOIL.hru	Hillslope length (m)	0 - 150	0 - 84.1
r__OV_N.hru	Manning coefficient for overland flow	-0.5 - 1	0.3 - 0.8
v__CH_N(2).rte	Manning coefficient for the main channel	0 - 0.3	0.12 - 0.3
v__CH_K(2).rte	Effective hydraulic conductivity of the main channel (mm/hr)	0 - 200	0 - 130
r__CH_K(1).sub	Effective hydraulic conductivity of the tributary channel (mm/hr)	0 - 0.6	0 - 0.32
v__LAT_TTIME.hru	Lateral flow travel time (days)	0 - 180	0 - 95
v__ALPHA_BNK.rte	Bank flow recession constant or constant of proportionality	0 - 1	0.32 - 0.48

*REVAP مقدار آبی است که در پاسخ به کمبود آب به سمت منطقه خاک حرکت می‌کند.

*REVAP is the amount of water that moves toward the soil in response to water shortages.

تحقیقات منابع آب ایران، سال سیزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶

Volume 13, No. 4, Winter 2018 (IR-WRR)

Table 2- Properties and calibrated values of parameters of salt balance module
جدول ۲- مشخصات پارامترهای ماچول بیلان نمک و مقادیر واسنجی شده آن‌ها (واحد: میلی گرم بر لیتر)

Parameter	Description	Initial interval	Final interval
$C_{lat,2}$	TDS of subsurface flow of the 2 nd sub-basin	1000 – 65000	24268 – 65000
$C_{s,2}$	TDS of overland flow of the 2 nd sub-basin	1000 – 43000	16433 – 43000
$C_{gw,2}$	TDS of base flow of the 2 nd sub-basin	1000 – 43000	14502 – 33326
$C_{lat,6}$	TDS of subsurface flow of the 6 th sub-basin	2000 – 65000	28270 – 54640
$C_{s,6}$	TDS of overland flow of the 6 th sub-basin	2000 – 35000	11061 – 32997
$C_{gw,6}$	TDS of base flow of the 6 th sub-basin	2000 – 45000	6269 – 32096
$C_{lat,13}$	TDS of subsurface flow of the 13 th sub-basin	3000 – 39000	9556 – 22051
$C_{s,13}$	TDS of overland flow of the 13 th sub-basin	3000 – 45000	3000 – 29252
$C_{gw,13}$	TDS of base flow of the 13 th sub-basin	3000 – 38000	5980 – 21928

شکل ۵ نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای متغیرهای دبی و کل جامدات محلول را نشان می‌دهند. همچنین در جدول ۳ مقادیر شاخص‌های عدم قطعیت در الگوریتم SUFI2 برای ایستگاه شکستیان به تفکیک دوره واسنجی و اعتبارسنجی ارائه شده است. مقادیر بیشتر از ۰/۷ یا ۰/۷۵ برای p-factor و مقادیر کمتر از ۱/۵ برای d-factor، مقادیر مناسبی هستند. این مسأله قطعا به مقیاس و موقعیت پروژه، صحت داده‌های ورودی و داده‌های واسنجی بستگی دارد. مقادیر بالاتر p-factor به‌ازای مقادیر بالاتر d-factor حاصل می‌شود. بنابراین باید یک تعادل بین مقادیر به‌دست آمده برای این دو شاخص وجود داشته باشد (Abbaspour et al., 2004;).

مقدار d-factor حاصل از واسنجی دبی جریان ماهانه ایستگاه شکستیان، ۱/۳ به‌دست آمده است و این در حالی است که مقدار p-factor، ۰/۸۶ است که نتیجه مطلوبی است. همچنین ضرایب R^2 و NS برای تعیین نکویی برازش استفاده شدند. در دوره واسنجی مقادیر R^2 و NS برای دبی جریان به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۷۳ به‌دست آمد که مطلوب است. در دوره اعتبارسنجی مقدار p-factor تغییری نکرده اما مقدار d-factor بهبود یافته است و به ۰/۷۳ کاهش پیدا کرده است که بیانگر اعتبارسنجی مناسب دبی جریان در حوضه آبریز است. همچنین ضرایب R^2 و NS مربوط به بهترین تخمین نیز در این دوره ۰/۸۱ و ۰/۷۱ به‌دست آمدند.

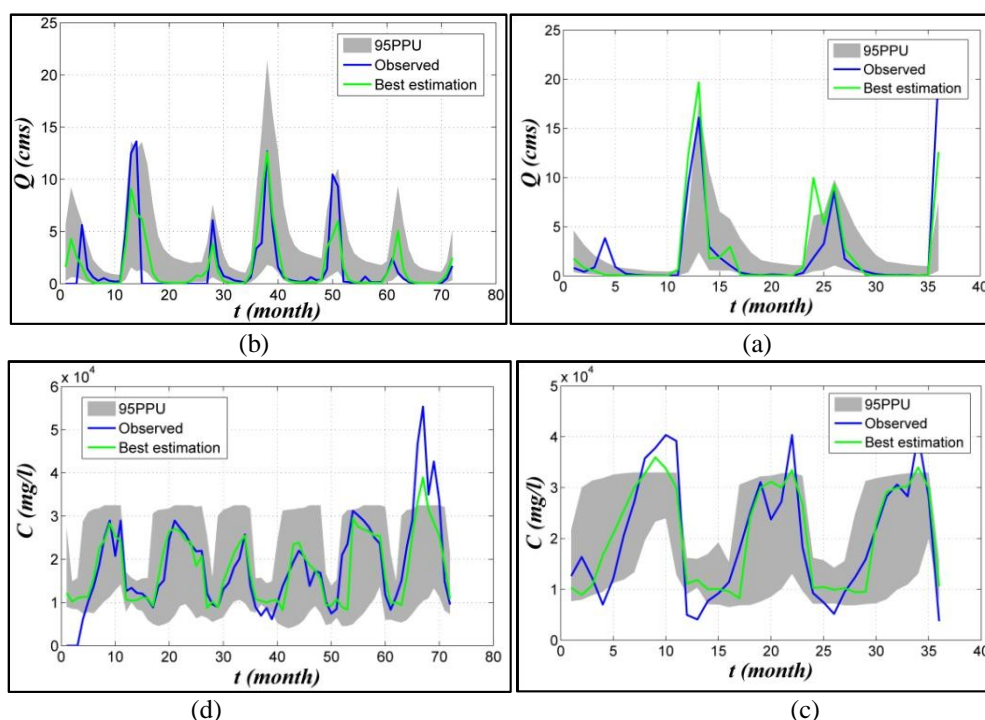


Fig. 5- Simulation results associated with time series of flow and TDS at Shekastian hydrometric station; a) flow-calibration, b) flow-validation, c) TDS-calibration, and d) TDS-validation

شکل ۵- نتایج شبیه‌سازی سری زمانی دبی و غلظت نمک در ایستگاه شکستیان؛ الف- دبی در دوره واسنجی؛ ب- دبی در دوره اعتبارسنجی؛ پ- TDS در دوره واسنجی؛ ت- TDS در دوره اعتبارسنجی

Table 3- Evaluation of uncertainty measures

جدول ۳- ارزیابی معیارهای عدم قطعیت

Calibration (1995-2000)								Validation (2001-2003)							
Q				C				Q				C			
p factor	d factor	R ²	NS	p factor	d factor	R ²	NS	p factor	d factor	R ²	NS	p factor	d factor	R ²	NS
0.86	1.3	0.76	0.73	0.89	1.9	0.63	0.56	0.86	0.73	0.81	0.76	0.7	1.4	0.81	0.65

حوضه آبریز مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به فرضهای ساده کننده‌ای که در این مدل‌سازی اتخاذ شد هنوز کارهای زیادی برای توسعه بهتر و بیشتر ماجول بیلان نمک ارائه شده قابل انجام است که می‌تواند در نهایت به توسعه مدل SWAT برای مدل‌سازی شوری بیانجامد. همچنین با توجه به آنکه در اینجا صرفاً شوری اولیه مورد نظر بود، باید در آینده توسعه مدل با توجه به ملاحظات شوری ثانویه و اثر اقدامات انسان بر شوری آب و خاک انجام گردد. نکته قابل ذکر دیگر در این زمینه آن است که باید در ضمن توسعه مدل به عوامل شوری اولیه از جمله سازندهای شور و گنبدهای نمکی به تفکیک توجه شود.

۶- مراجع

- Abbaspour KC, Johnson C, Van Genuchten MT (2004) Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 3(4):1340-1352
- Abbaspour KC, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H, Kløve B (2015) A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524:733-752
- Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J, Srinivasan R (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333(2):413-430
- Abgir CE (2014) Updating national master water plan- Helleh river basin- synthesis report. Ministry of Energy
- Arnold JG, Moriasi DN, Gassman PW, Abbaspour KC, White MJ, Srinivasan R, Santhi C, Harmel RD, van Griensven A, Van Liew MW, Kannan N, Jha MK (2012) SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4):1491-1508
- Biggs AJ, Silburn DM, Power RE (2013) Catchment salt balances in the Queensland Murray-Darling Basin, Australia. *Journal of Hydrology* 500:104-113
- Cai X, McKinney DC, Lasdon LS (2003) Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river

یکی از دلایل بالا بودن و در واقع مناسب بودن مقادیر p-factor می‌تواند این مورد باشد که جریان پایه شبیه‌سازی شده توسط مدل، به مقادیر مشاهداتی نزدیک است. در نتیجه مقادیر مشاهده‌ای دبی جریان در ایستگاه شکستیان، عمدتاً درون باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار می‌گیرند. با دقت در شکل ۵-الف و شکل ۵-ب مشاهده می‌شود که مدل، زمان رسیدن به حداکثر دبی را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. در کل نتایج واسنجی و اعتبارسنجی کمی مدل، با وجود عدم قطعیت‌های ذکر شده، مطلوب ارزیابی می‌شود. در دوره واسنجی برای غلظت کل جامدات محلول، مقدار d-factor ۱/۹ و مقدار p-factor ۰/۸۹ است. ضرایب R² و NS مربوط به بهترین تخمین نیز در این دوره ۰/۶۳ و ۰/۵۶ به دست آمدند. در ماه‌های انتهایی این دوره، به دلیل پایین بودن بیش از اندازه جریان پایه، میزان غلظت نمک افزایش چشم‌گیری داشته و مدل نتوانسته به خوبی این مسأله را کنترل کند. در دوره اعتبارسنجی، مقدار d-factor کاهش پیدا کرده و به مقدار نسبتاً مناسب ۱/۴ رسیده است اما مقدار p-factor نیز ۰/۷ کاهش یافته است. ضرایب R² و NS نیز در دوره اعتبارسنجی ۰/۸۱ و ۰/۶۵ به دست آمدند.

در نهایت با توجه به مقادیر شاخص‌ها برای هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی می‌توان گفت مدل قابلیت نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی آبدهی و غلظت نمک دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به منظور بررسی شوری طبیعی حوضه آبریز رودخانه حله، یک مدل ترکیبی بیلان آب- نمک توسعه داده شد. مدل از دو ماجول بیلان آب و ماجول بیلان نمک تشکیل شده است. از مدل هیدرولوژیکی SWAT، که نسخه اصلی آن قادر به شبیه‌سازی شوری منابع آب نیست، برای ساخت ماجول بیلان آب استفاده شد و ماجول بیلان نمک نیز با کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB تهیه شد. یکی از موضوعات مهم در این تحقیق نحوه کالیبراسیون این مدل ترکیبی بیلان آب و نمک است که به آن پرداخته شد و از روش SUFI2 استفاده شد. نتایج در ایستگاه شکستیان نشان از عملکرد مناسب مدل دارد. به این معنا که مدل این توانایی را دارد تا با یک سطح اطمینان مناسب، به عنوان یک مدل شبیه‌ساز شوری طبیعی

- Sea Basin at high spatial and temporal resolution. *Water Resources Research* 50(7):5866-5885
- Saysel AK, Barlas Y (2001) A dynamic model of salinization on irrigated lands. *Ecological Modelling* 139(2):177-199
- Somura H, Arnold J, Hoffman D, Takeda I, Mori Y, Di Luzio M (2009) Impact of climate change on the Hii River basin and salinity in Lake Shinji: a case study using the SWAT model and a regression curve. *Hydrological Processes* 23(13):1887-1900
- Sowers J, Vengosh A, Weinthal E (2011) Climate change, water resources, and the politics of adaptation in the Middle East and North Africa. *Climatic Change* 104(3):599-627
- Vengosh A (2003) Salinization and saline environments. *Treatise on Geochemistry* 9:333-365
- basin management. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE* 129(1):4-17
- Gikas GD, Yiannakopoulou T, Tsihrintzis VA (2009) Hydrodynamic and nutrient modeling in a Mediterranean coastal lagoon. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 44(13):1400-1423
- Mittelstet AR, Storm DE, Stoecker AL (2015) Using SWAT to simulate crop yields and salinity levels in the North Fork River Basin, USA. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8(3):110
- Piman T, Lennaerts T, Southalack P (2013) Assessment of hydrological changes in the lower Mekong Basin from Basin-Wide development scenarios. *Hydrological Processes* 27(15):2115-2125
- Rouholahnejad E, Abbaspour KC, Srinivasan R, Bacu V, Lehmann A (2014) Water resources of the Black