



Calibration of VIC-3L Hydrological Model Using Satellite-Based Surface Soil Moisture Datasets

S. Koochi¹, A. Azizian^{2*}, and L. Brocca³

Abstract

River discharge modeling is one of the fundamental challenges of researchers and engineers over the past decades. Although using hydrological models is one of the best ways, but the lack of observed flow datasets for calibration of these models restricts the applicability of them in most catchments, especially in ungauged river basins. On the other hand, due to increasing satellite-based technologies over the past years, several remotely sensed datasets such as precipitation, temperature and surface soil moisture have been developed and because of having different spatiotemporal resolutions are interested by most researchers. This study addresses the efficiency of ASCAT surface soil moisture (SSM) for calibration of VIC-3L hydrologic model over the Sefidrood river basin (SRB). Findings on daily time scale indicate that the correlation coefficient (CC) between observed and simulated streamflow, using ASCAT dataset, is equal to 0.75, while in the case of calibration of the VIC-3L model using only with hydrometric station datasets the CC value is equal to 0.80. Moreover, at monthly time scale the performance of model in simulating streamflow is better than daily time scale. The relative error (RE) in simulating runoff volume at daily and monthly time scale is 17.2% and 38.5%, respectively and this shows that using ASCAT dataset at monthly time scale leads to reliable results. In addition, one of the advantages of model calibration using satellite-based SSM is the extraction of the spatial pattern of model parameters over the catchment, while in the case of using observed discharge dataset for calibration of the model only leads to the constant values of model's parameter through the catchment. Based on the results of this research it is highly recommended to use satellite-based SSMs for calibration of hydrological model, especially in data limited areas or regions in which ground observations are sparsely-distributed or insufficient.

Keywords: Surface Soil Moisture (SSM), Remote Sensing, Runoff, Calibration, VIC-3L Model.

Received: April 4, 2018

Accepted: August 16, 2019

واسنجی مدل هیدرولوژیکی VIC-3L با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت سطحی خاک

سکینه کوهی^۱، اصغر عزیزیان^{۲*} و لوکا بروکا^۳

چکیده

مدل‌سازی جریان خروجی از حوضه‌های آبریز با مدل‌های هیدرولوژیکی همواره یکی از چالش‌های اساسی پیش‌روی محققین و مهندسیین بوده است؛ زیرا که عدم وجود داده‌های مشاهده‌ای دبی برای واسنجی مدل‌های مذکور، کاربرد آنها را در بسیاری از حوضه‌ها با محدودیت روبرو می‌نماید. از طرفی با توجه به گسترش فناوری‌های سنجش از دور در سالهای اخیر، منابع ماهواره‌ای بسیار متعددی به منظور تخمین مقدار بارش، دما، رطوبت سطحی خاک و غیره توسعه داده شده است که مورد توجه بسیاری از محققین می‌باشند. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی داده‌های ماهواره‌ای رطوبت سطحی خاک ASCAT در واسنجی مدل هیدرولوژیکی VIC-3L در سطح حوضه آبریز سفیدرود به انجام رسیده است. نتایج بدست آمده در گام زمانی روزانه حاکی از آن است که در صورت استفاده از منبع رطوبتی ASCAT مقدار ضریب همبستگی بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در حدود ۰/۷۵ می‌باشد؛ این در حالی است که در صورت استفاده از داده‌های جریان مشاهداتی برای واسنجی مدل، مقدار ضریب همبستگی در حدود ۰/۸۰ می‌باشد. در گام زمانی ماهانه نیز استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت سطحی خاک، منجر به افزایش عملکرد مدل VIC-3L در شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه شده است. همچنین از آنجایی که میزان خطای مدل در برآورد حجم رواناب در گام زمانی ماهانه (۱۷/۲ درصد) نسبت به گام زمانی روزانه (۳۸/۵ درصد) به مراتب کمتر می‌باشد، از این روش واسنجی می‌توان برای تخمین آورد ماهانه با دقت قابل استفاده بعمل آورد. از مزیت‌های واسنجی مدل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک می‌توان به لحاظ نمودن تغییرات مکانی پارامترهای مدل در سطح حوضه اشاره نمود که این مساله می‌تواند دید بهتری از عملکرد مدل در سطح حوضه را فراهم نماید. همچنین، عدم وجود داده‌های دبی ثبت شده در بسیاری از حوضه‌ها، امکان واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی را با محدودیت اساسی روبرو می‌نماید.

کلمات کلیدی: رطوبت سطحی خاک، سنجش از دور، رواناب، واسنجی،

مدل VIC-3L.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۵/۲۵

1- MSc in Water Resources Engineering, Water engineering Deptment, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Assistant Professor, Water Engineering Deptment, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: azizian@eng.ikiu.ac.ir

3- Researcher, Research Institute for Geo-Hydrological Protection IRPI, Perugia, Italy.

*- Corresponding author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۳- پژوهشگر موسسه تحقیقات ژئوهیدرولوژی IRPI و عضو هیئت علمی دانشگاه پروجا.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

رطوبت سطحی خاک برای مقاصد هم‌چون مدل‌سازی هیدرولوژیکی صورت گرفته است می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. Liu et al. (2018) به واسطه مدل هیدرولوژیکی SWAT با استفاده از داده‌های رطوبتی ESA-CCI در حوضه آبریز رودخانه هوآی پرداختند. نتایج بدست آمده حاکی از تأثیر بالای استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک در شبیه‌سازی جریان‌های کوچک داشت؛ در حالی که این تأثیر در جریان‌های بزرگ، کمتر بوده است. همچنین، Brocca et al. (2010) در پژوهشی به بررسی تأثیر استفاده از شاخص رطوبت خاک^۲ بدست آمده از سنجنده ASCAT، بر عملکرد مدل بارش-رواناب MISDc در تخمین رواناب پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از منبع رطوبتی ASCAT از کارایی مناسبی جهت بهبود عملکرد مدل بارش-رواناب MISDc در شبیه‌سازی رواناب برخوردار می‌باشد. Wanders et al. (2014) نیز کارایی محصولات رطوبتی خاک منابع AMSR-E، SMOS و ASCAT در واسنجی مدل هیدرولوژیکی LISFLOOD برای شبیه‌سازی جریان، را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از منابع رطوبت خاک در واسنجی مدل هیدرولوژیکی نسبت به واسنجی این مدل تنها بر اساس جریان مشاهداتی حوضه، منجر به کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصدی شاخص RMSE می‌شود. همچنین، López López et al. (2016) در پژوهشی به ارزیابی تأثیر استفاده از داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR-E و نیز داده‌های جریان مشاهداتی به شبیه‌سازی جریان توسط مدل بزرگ مقیاس PCR-GLOBWB پرداختند. نتایج نشان داد که مدل PCR-GLOBWB بدون استفاده از داده‌های مشاهده‌ای جریان و رطوبت خاک از عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی جریان برخوردار نمی‌باشد. از سویی دیگر واسنجی این مدل با استفاده از تصاویر رطوبت خاک و جریان رودخانه بصورت هم‌زمان با کاهش ۲۰ درصدی در مقدار شاخص RMSE، سبب بهبود شبیه‌سازی جریان شده است.

با توجه به توضیحات فوق، مشاهده می‌شود که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک از کارایی بالایی در افزایش عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی برخوردار می‌باشند. ولی متأسفانه در سطح کشورمان در کمتر تحقیقی به اهمیت این منابع اطلاعاتی ارزشمند و کاربردهای آنها پرداخته شده است. با توجه به کمبود و یا عدم دسترسی به داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی در اکثر حوضه‌ها، استفاده از این منابع می‌تواند راهگشای بسیاری از مشکلات پیش‌روی محققین در تخمین جریان رودخانه‌ها بمنظور برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب باشد. لذا با توجه به توضیحات فوق، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی کارایی منبع ماهواره‌ای رطوبت خاک ASCAT در واسنجی خروجی (رواناب) مدل هیدرولوژیکی توزیعی VIC-3L در حوضه آبریز

برآورد دقیق مقدار جریان رودخانه‌ها و رواناب خروجی از حوضه‌ها با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی همواره از دغدغه‌های هیدرولوژیست‌ها، محققین و مهندسين در حوضه‌های با کمبود آمار بوده است (Sivapalan, 2003; Wagener and Montanari, 2011). با توجه به گسترش روزافزون فناوری و تکنولوژی‌های سنجش از دور در تخمین داده‌های آب و هواشناسی، یکی از راهکارهای مورد استفاده برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی که از توانایی ارائه اجزای بیلان آب یا انرژی برخوردار می‌باشند، استفاده از محصولات سنجنده‌های ماهواره‌ای می‌باشد. از میان مؤلفه‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی که توسط تکنیک‌های سنجش از دور در سال‌های اخیر ایجاد شده، بارش و رطوبت خاک از اهمیت و کاربرد بسیار زیادی در مطالعات منابع آب، پایش خشکسالی، مطالعات تغییر اقلیم و غیره برخوردار می‌باشند. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی منابع بارشی ماهواره‌ای در حوضه‌های آبریز مختلف جهان به انجام رسیده است، اما در زمینه ارزیابی کارایی منابع ماهواره‌ای رطوبت سطحی خاک در مدل‌سازی هیدرولوژیکی مطالعات به مراتب کمتری صورت گرفته است. رطوبت سطحی خاک^۱ برخلاف اینکه سهم بسیار اندکی از آب شیرین و قابل استفاده در سراسر جهان را تشکیل می‌دهد، یکی از تأثیرگذارترین پارامترها بر بیلان آب، انرژی و کربن می‌باشد (Legates et al., 2011). این پارامتر از نقش مهمی در تعیین سهم نفوذ، تبخیر و در نتیجه شکل‌گیری و میزان رواناب حوضه برخوردار می‌باشد (Koster et al., 2004; Daly and Porporato, 2005). روش‌های مختلفی برای تخمین مقدار رطوبت لایه سطحی خاک وجود دارد که از مهم‌ترین آن می‌توان به اندازه‌گیری در محل، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی یا مدل‌های سطح زمین (LSMs) و تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از دور اشاره نمود. با وجود اینکه اندازه‌گیری محلی رطوبت سطحی خاک اطلاعات دقیقی را در خصوص این پارامتر در اختیار قرار می‌دهد، ولی با توجه به پراکنش نامناسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری در اکثر کشورها و همچنین هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن آن، استفاده از این روش عموماً برای استفاده در مقیاس‌های بزرگتر از مزرعه و کاربرد در سطح حوضه با محدودیت روبرو می‌باشد (Brocca et al., 2007). امروزه با افزایش روزافزون فناوری و تکنولوژی ماهواره‌ای، منابع رطوبتی متعددی (مانند: AMSR-E، ASCAT، SMAP، SMOS) توسط سازمان‌های مختلف توسعه داده شده است که هر کدام دارای توان تفکیک مکانی و زمانی مختلفی می‌باشند.

از جمله مهم‌ترین پژوهش‌هایی که در زمینه استفاده از داده‌های

گیلوان نشان داده شده است. همچنین، لازم به ذکر است که در این پژوهش از داده‌های دبی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری گیلوان (خروجی حوضه) که در مختصات طولی ۴۹ درجه شرقی و عرضی ۳۶/۵ درجه شمالی واقع شده است، استفاده بعمل آمده است.

۲-۲- مدل هیدرولوژیکی VIC-3L

مدل هیدرولوژیکی مورد استفاده در این پژوهش مدل VIC-3L می‌باشد. این مدل که برای اولین بار توسط Liang et al. (1994) ارائه شده است، از توانایی شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی رطوبت خاک به بارش، تابش سطح و شرایط هواشناسی در ارتباط با سطح خاک برخوردار می‌باشد. در این مدل معادلات مربوط به بیلان آب و انرژی در یک شبکه سلولی و بطور مستقل برای هر سلول محاسبه می‌شود. مدل VIC در اصل برای اتصال با مدل‌های GCMs توسعه داده شده است که دارای مدل سطح زمین جهت مدل‌سازی هیدرولوژیکی و برآورد بیلان انرژی و بیلان آب می‌باشد. Liang et al. (1996) به این نتیجه رسیدند که مدل ۲ لایه VIC بعلت عدم وجود یک مکانیزم کارا برای انتقال رطوبت از لایه پایین به لایه بالایی خاک، مقادیر تبخیر را کم برآورد می‌کند. در نتیجه این محققین برای اصلاح مدل VIC-2L (جهت در نظر گرفتن پخشیدگی رطوبت بین لایه‌های خاک)، یک لایه ۱۰ سانتی متری بر روی لایه فوقانی قبلی (لایه بالایی در مدل ۲ لایه) لحاظ نمودند.

سفیدرود می‌باشد. همچنین، برای به چالش کشیدن میزان کارایی داده‌های رطوبتی خاک در شبیه‌سازی جریان توسط مدل VIC-3L از داده‌های جریان مشاهداتی در خروجی حوضه نیز استفاده بعمل خواهد آمد (روش متداول برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی). علت انتخاب مدل توزیعی VIC-3L که جزئیات آن به تفصیل در بخش مواد و روش‌ها آورده شده است، ساختار توزیعی آن می‌باشد که امکان واسنجی سلول به سلول بین رطوبت ماهواره‌ای و رطوبت سطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل را فراهم می‌نماید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- حوضه مورد مطالعه

حوزه آبریز رودخانه سفیدرود در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران بخشی از حوضه آبریز دریای خزر محسوب شده و در محدوده تلاقی رشته کوه‌های البرز-زاگرس و مرکزی قرار دارد. مساحت آبریز این حوضه برابر با ۵۹/۴ هزار کیلومترمربع بوده که ۷۵ درصد آن را مناطق کوهستانی و حدود ۲۵ درصد آن را نیز دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل داده است. دشت‌ها در دو بخش علیا و بخش پایاب حوضه آبریز واقع شده و مناطق مرکزی آن کوهستانی می‌باشد. همچنین، محیط و متوسط ارتفاع این حوضه نیز به ترتیب معادل ۱۶۵۰ کیلومتر و ۱۵۲۵ متر (از سطح آزاد دریا) می‌باشد. در شکل ۱ نمایی از موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز مورد مطالعه، تغییرات ارتفاعی آن و ایستگاه هیدرومتری

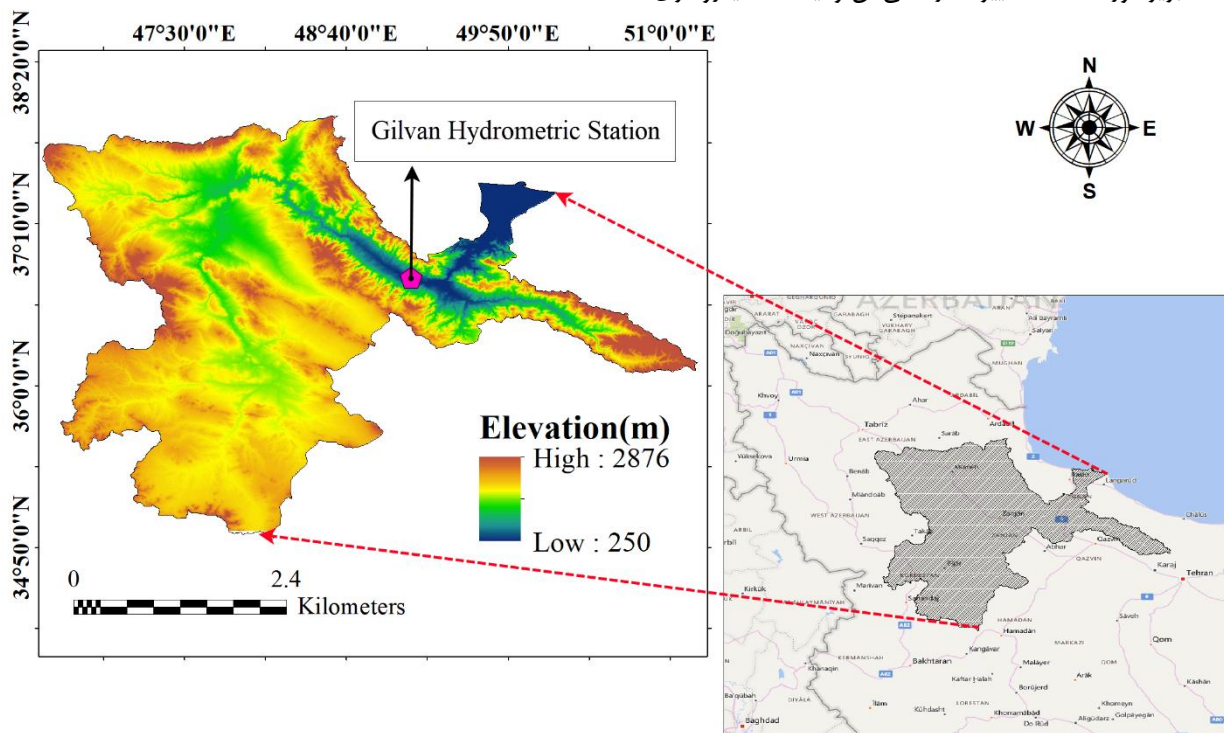


Fig. 1- The geographic location of the study area

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز مورد مطالعه

$$E = \sum_{n=1}^N C_n \cdot (E_{c,n} + E_{t,n}) + C_{N+1} \cdot E_1 \quad (5)$$

که در آن، E_c ، E_t و E_1 بترتیب تبخیر از تاج پوشش گیاهان، تعرق از سطح پوشش گیاهان و تبخیر از سطح خاک لخت (میلی‌متر)، C_n : درصد مربوط به پوشش گیاهی n ام در هر سلول و C_{N+1} : درصد مربوط به سطح پوشش خاک لخت و $\sum_{n=1}^{N+1} C_n = 1$ می‌باشند.

در پژوهش حاضر، برای استخراج داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل (بارش، سرعت باد، رطوبت هوا، حداقل و حداکثر دمای روزانه) از اطلاعات ثبت شده توسط ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی داخل و خارج از حوضه استفاده بعمل آمده است. علاوه بر این برای استخراج داده‌های مربوط به پوشش گیاهی حوضه (شاخص سطح برگ، ضریب آلبیدو، حداقل مقاومت روزنه‌ای، مقاومت ساختاری گیاه، طول زبری، طول جابجایی و حداقل تابش با طول موج کوتاه) از تصاویر ماهواره‌ای مربوط به AVHRR استفاده شده است. همچنین، با استفاده از نقشه‌های خاک برخی از پارامترهای مربوط به مدل استخراج شده است. از آنجایی که برخی پارامترهای خاک مورد استفاده در مدل VIC-3L مفهومی بوده و گاهی دارای مقادیر غیرفیزیکی می‌باشند، نیاز است که مقادیر این پارامترها طی فرآیند واسنجی برای حوضه مورد مطالعه تخمین زده شوند. طبق مطالعات صورت پذیرفته توسط Azizian and Shokoochi (2017) و Guo et al. (2004) تعدادی از پارامترهای مربوط به خاک از اهمیت زیادی در شبیه‌سازی رطوبت لایه‌های خاک و همچنین مقدار رواناب سطحی و زیرسطحی برخوردار می‌باشند، که این پارامترها و محدوده تغییرات هر یک از آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین لازم بذکر است که در این پژوهش برای واسنجی مدل VIC-3L از روش احتمالاتی 2 GLUE که توسط Beven and Beinly (2001) توسعه داده شده، استفاده گردیده است. علت انتخاب این روش، عملکرد بالای آن در شناسایی پارامترهای بهینه و نیز فرآیند اجرایی ساده‌تر آن نسبت به دیگر روشهای بهینه‌سازی می‌باشد.

۲-۳- منبع رطوبت سطحی خاک ASCAT

محصول رطوبت خاک ASCAT توسط EUMETSAT با استفاده از نرم‌افزار WARPNT که در ابتدا توسط دانشگاه تکنولوژی وین^۴ توسعه یافت، تولید شده است. ASCAT یک ابزار راداری است که از سال ۲۰۰۶ در باند C (۵/۲۵۵ گیگاهرتز) و بر روی ماهواره Metop قرار گرفته است. تفکر موجود برای استخراج اطلاعات رطوبت خاک این منبع رطوبتی بر اساس یک روش تشخیص مبتنی بر تغییرات^۵ که

به این صورت مدل ۳ لایه VIC-3L معرفی گردید. ۲ لایه فوقانی خاک برای مدل‌سازی پاسخ دینامیکی خاک به بارش نفوذ یافته می‌باشد که در آن اثر پخشیدگی رطوبت بین لایه میانی و لایه بالایی (زمانی که لایه میانی مرطوب‌تر باشد) نیز لحاظ شده است. لایه تحتانی خاک نیز طی فرآیند نفوذ ثقی، رطوبت خود را از رطوبت لایه میانی دریافت می‌کند. در این مدل مقدار رواناب براساس نظریه منحنی نفوذ متغیر محاسبه می‌شود (Zhao et al., 1980). در این نظریه فرض می‌شود که رواناب سطحی لایه‌های بالایی توسط مناطقی ایجاد می‌گردد که در آن‌ها مقدار بارش از ظرفیت ذخیره خاک تجاوز نماید. در این مدل رواناب کلی یک سلول با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$Q = \sum_{n=1}^{N+1} C_n \times (Q_{d,n} + Q_{b,n}) \quad (1)$$

که در آن، $Q_{d,n}$: رواناب سطحی، $Q_{b,n}$: رواناب زیرسطحی و C_n درصد مربوط به پوشش گیاهی برای n پوشش گیاهی متفاوت در یک سلول می‌باشند. در مدل VIC فرض بر این است که هیچگونه جریان جانبی در لایه‌های بالایی خاک وارد نمی‌شود و در نتیجه می‌توان حرکت رطوبت در خاک را با معادله ۱ بعدی ریچاردز (رابطه ۲) مدل‌سازی نمود.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z}) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (2)$$

که در آن، θ : محتوی حجمی رطوبت خاک، $D(\theta)$: ضریب پخشیدگی آب موجود در خاک (میلیمتر در روز)، $K(\theta)$: ضریب هدایت هیدرولیکی خاک (میلیمتر در روز) و z : عمق خاک می‌باشد. با در نظر گرفتن عوامل هواشناسی (مانند باران، برف، رطوبت هوا، دمای هوا، سرعت باد و غیره) رطوبت کلی خاک در لایه‌های بالایی را می‌توان به صورت رابطه ۳ بیان نمود (Mahrt and Pan, 1984).

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial t} \cdot z_i = I - E - K(\theta) \Big|_{-z_i} + D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{-z_i} \quad (3)$$

(i=1,2)

که در آن، I : نرخ نفوذ آب در خاک (میلیمتر در روز)، Z_1 و Z_2 : عمق خاک در لایه‌های ۱ و ۲ و E : تبخیر (میلی‌متر) می‌باشند. برای لایه تحتانی از یک رابطه تجربی که بر مبنای مفاهیم هیدرولوژی حوضه‌های بزرگ مقیاس می‌باشد، استفاده شده است. رطوبت خاک در این لایه با استفاده از معادله بیلان آب و در نظر گرفتن پخشیدگی بین لایه‌های فوقانی خاک با استفاده از رابطه ۴ قابل محاسبه می‌باشد:

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial t} \cdot (z_3 - z_2) = K(\theta) \Big|_{-z_2} + D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{-z_2} - E - Q_b \quad (4)$$

مقدار تبخیر و تعرق در این مدل مجموع ۳ نوع تبخیر: تبخیر از تاج پوشش گیاهان، تعرق از سطح پوشش گیاهان و تبخیر از سطح خاک لخت می‌باشد که با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد:

Table 1- Parameters of VIC-3L model and the range of their variations

جدول ۱- پارامترهای واسنجی مدل VIC-3L و دامنه تغییرات آنها

Parameter	Definition	Range of Variation
b_{inf}	The shape of the variable infiltration capacity curve	0.01-0.4
D_s	The fraction of D_{smax} where nonlinear base flow occurs	0.01-1
D_{smax}	The maximum base flow velocity from the lowest soil layer (mm/day)	0.01-30
W_s	The fraction of the maximum soil moisture of the lowest soil layer where nonlinear base flow occurs	0.01-1
C	Power used in base discharge curve	0.01-2
d_2	The thickness of the second soil layer (m)	0.1-2.5
d_3	The thickness of the third soil layer (m)	0.1-1.5

۴-۲- فرآیند واسنجی مدل VIC-3L

عدم وجود اطلاعات مشاهداتی از وضعیت رطوبت و تبخیر و تعرق در سطح حوضه، امکان واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی را از این طریق میسر نمی‌سازد و به همین خاطر بیشتر محققین از داده‌های دبی مشاهداتی موجود در خروجی حوضه برای این منظور استفاده می‌نمایند (Shayeghi et al., 2019).

برای اولین بار توسط Wagner et al. (1999a, 1999b, 1999c) ارائه شده است، می‌باشد. محصولات رطوبت خاک ASCAT با اندازه سلول حدود ۲۵ کیلومتر، در مقیاس زمانی ۳ روز و مربوط به لایه سطحی خاک با عمق ۲ سانتی‌متر می‌باشند (Wanders et al., 2014). الگوریتم بازبازی اطلاعات رطوبت خاک در یک بسته نرم‌افزاری با نام WARP^۶ پیاده‌سازی شده است (Naeimi et al., 2009). نحوه تخمین مقدار رطوبت سطحی خاک با الگوریتم مورد استفاده در WARP در شکل ۲ نشان داده شده است.

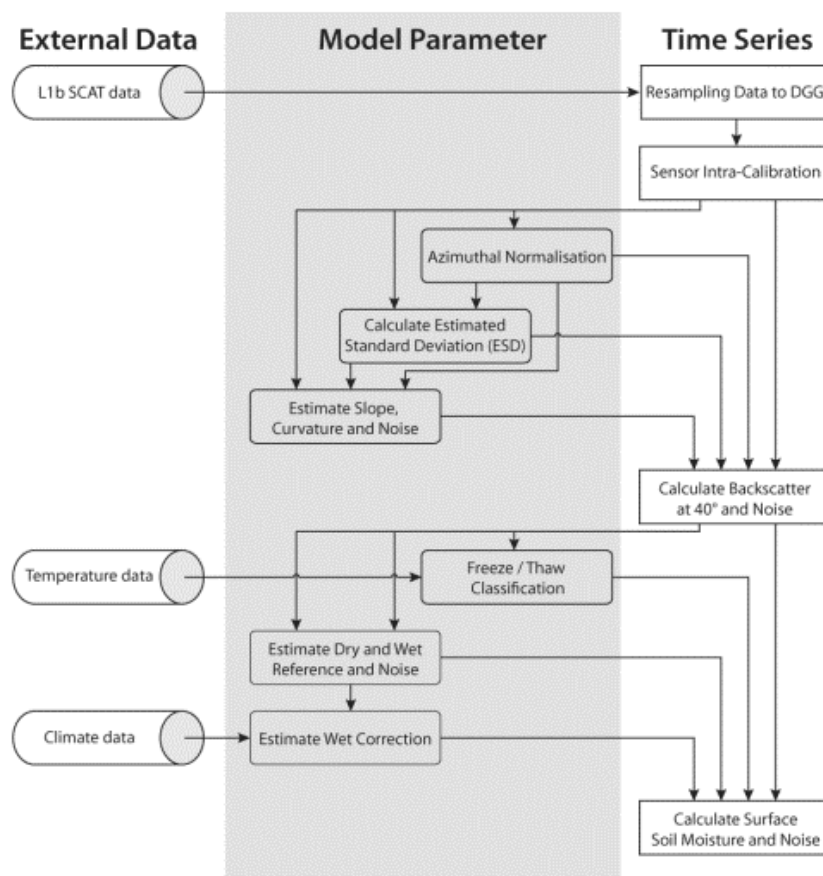


Fig. 2- Overview of the processing steps in WARP for estimation of soil moisture

شکل ۲- نمایی از فرآیند مورد استفاده در WARP برای محاسبه مقدار رطوبت خاک

این رویکرد و داده‌های مشاهداتی می‌توان عملکرد مدل را مورد ارزیابی قرار داد. بر خلاف سناریو ۱، در این سناریو می‌توان توزیع مکانی پارامترهای مدل را در سطح حوضه به خوبی نشان داد.

۳- اجرای مدل هیدرولوژیکی با استفاده میانگین مکانی پارامترهای مدل: در این روش از متوسط مقادیر پارامترهای بهینه بدست آمده در سناریو استفاده و رواناب خروجی از حوضه محاسبه خواهد گردید.

در این تحقیق از سری زمانی جریان روزانه ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری گیلوان (واقع در خروجی حوضه سفیدرود) برای ارزیابی راهکارهای واسنجی مذکور استفاده بعمل آمده است. در شبیه‌سازی رواناب و رطوبت خاک توسط مدل VIC-3L، پارامترهای خاک از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشند و لذا برای حصول نتایج قابل اعتماد بایستی در برآورد پارامترهای خاک نهایت دقت را بعمل آورد. بررسی تحقیقات صورت گرفته (Gao et al., 2004; Azizian and Shokoochi, 2017) حاکی از آن است که برای شبیه‌سازی رواناب، مهمترین پارامترهای ورودی عبارتند از: D_m (پارامتر مربوط به حداکثر دبی پایه قابل تولید توسط لایه تحتانی خاک)، D_s (کسری از پارامتر D_m که در آن دبی پایه غیرخطی شروع می‌شود)، W_s (کسری از حداکثر رطوبت موجود در لایه تحتانی خاک که در آن دبی پایه غیر خطی رخ می‌دهد)، b_{inf} (پارامتر مربوط به شکل منحنی ظرفیت نفوذ متغیر) و d_2 ، d_3 (اعماق خاک). جهت کاهش پارامترهای واسنجی معمولاً فرض بر این است که عمق لایه اول معادل ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که علی‌رغم وجود روش‌های مختلف واسنجی، در پژوهش حاضر از روش احتمالاتی GLUE که از فرآیند عملیاتی کردن به مراتب ساده‌تری به ویژه در محیط سیستم عامل Linux برخوردار است، استفاده بعمل آمد. برای آشنایی بیشتر با روش GLUE توصیه می‌شود به (Beven and Binley (1992) و Freer et al. (1996) مراجعه شود.

۲-۵- شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش بمنظور ارزیابی مقادیر رطوبت لایه سطحی شبیه‌سازی شده هر سلول توسط مدل VIC-3L و رطوبت سطحی بدست آمده از منبع رطوبتی ASCAT از شاخص‌های مهمی همچون ضریب همبستگی (CC)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NS) و شاخص RMSE استفاده بعمل آمد. همچنین لازم به ذکر است که برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه نیز از شاخص‌های مذکور استفاده گردید. نحوه محاسبه هر یک از

در پژوهش حاضر علاوه بر استفاده از راهکار مذکور، از تصاویر ماهواره‌ای رطوبت شبکه‌بندی شده ASCAT استفاده گردید و رطوبت سطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولوژیکی VIC-3L برای تک تک سلول‌های تشکیل دهنده حوضه، واسنجی گردید. به عبارت دیگر مقادیر رطوبت سطحی خاک بدست آمده از منبع ASCAT به عنوان رطوبت مشاهداتی هر کدام از سلول‌های محاسباتی مدنظر قرار گرفت. با بهینه نمودن مقادیر رطوبت سطحی خاک که در اثر تغییر پارامترهای خاک حاصل شده است، مقادیر مربوط به رواناب سطحی، زیرسطحی و غیره نیز به عنوان مقادیر بهینه مدنظر قرار گرفتند. با جمع‌آوری و روندیابی رواناب سطحی و زیرسطحی بهینه شده از سطح سلول‌های محاسباتی، مقدار رواناب خروجی از حوضه قابل محاسبه می‌باشد. با مقایسه رواناب خروجی شبیه‌سازی شده با مقادیر دبی مشاهداتی می‌توان بر اساس شاخص‌های آماری، عملکرد مدل VIC-3L را مورد ارزیابی قرار داد. یکی از مزایای استفاده از این راهکار واسنجی این است که می‌توان تغییرات مکانی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی را در سطح حوضه مورد مطالعه نیز به خوبی نشان داد. در یک جمع‌بندی کلی سناریوهای مورد استفاده برای واسنجی مدل VIC-3L را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

۱- واسنجی مدل هیدرولوژیکی تنها با استفاده از سری زمانی دبی مشاهداتی: در این روش بایستی پارامترهای مدل به نحوی تغییر داده شوند که خروجی رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر مشاهداتی جریان در خروجی حوضه، دارای بیشترین تشابه و هماهنگی باشند. در این روش امکان بررسی تغییرات مکانی پارامترهای مدل در سطح حوضه میسر نخواهد بود و در انتهای واسنجی تنها یک مقدار مشخص برای پارامترهای مدل بدست خواهد آمد. یکی دیگر از مشکلات این روش این است که در حوضه فاقد آمار و یا آمار کم جریان، امکان ارزیابی عملکرد مدل هیدرولوژیکی به علت عدم کفایت داده‌های مشاهداتی جریان، میسر نخواهد بود.

۲- واسنجی مدل هیدرولوژیکی با استفاده داده‌های رطوبت ماهواره‌ای:

در این روش، پارامترهای مدل توزیعی VIC-3L برای هر سلول طوری تغییر داده می‌شود تا اختلاف بین سری زمانی رطوبت سطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر بدست آمده از منبع رطوبتی ASCAT به حداقل مقدار خود برسد. با حداقل کردن اختلاف بین دو سری زمانی مذکور، مقادیر پارامترهای بهینه مدل برای هر کدام از سلول‌ها به طور جداگانه محاسبه خواهد گردید. پس از جمع‌آوری و روندیابی رواناب سطحی و زیرسطحی سلول‌های محاسباتی و هدایت آنها به خروجی حوضه، سری زمانی جریان خروجی از حوضه بدست خواهد آمد. با مقایسه بین رواناب شبیه‌سازی شده با

توان نگهداشت رطوبتی خاک افزایش یافته و به مرور زمان در اثر نفوذ ثقلی و یا تبخیر و تعرق از خاک خارج خواهد شد. همانطور که ملاحظه می‌گردد بر خلاف سناریوی ۱، استفاده از رویکرد توزیعی برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی دید بهتری را نسبت به تغییرات مکانی فرآیندهای هیدرولوژیکی فراهم می‌نماید.

۳-۲- ارزیابی مدل VIC-3L در شبیه‌سازی رواناب

۳-۲-۱- مقیاس زمانی روزانه

در این بخش به تشریح عملکرد مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی جریان در مقیاس زمانی روزانه در سناریوهای مختلف پرداخته شده است. هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل VIC-3L در سناریوهای مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین بمنظور ارزیابی هرچه بهتر کارایی مدل VIC-3L در سناریوهای مختلف، نمودار پراکنش اطلاعات بین مقادیر جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نیز ارائه گردید (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهد که اگرچه بهترین عملکرد مدل VIC-3L (بر اساس شاخص کارایی نش-ساتکلیف) در حالتی ایجاد شده که فرآیند واسنجی با مقادیر مشاهده‌ای جریان صورت گرفته است، اما استفاده از رویکرد توزیعی برای واسنجی نیز با دارا بودن ضریب نش-ساتکلیف معادل ۰/۵۹ از عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه برخوردار است.

شاخص‌های مذکور در جدول ۲ ارائه شده است. از میان شاخص‌های مذکور، نزدیک بودن شاخص RMSE به صفر بیان دقت بالای مقادیر شبیه‌سازی است و این درحالیست که برای شاخص‌های همبستگی و نش-ساتکلیف عدد ۱ بیانگر بالاترین همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای می‌باشد.

۳- نتایج

۳-۱- ارزیابی پارامترهای خاک مدل VIC-3L پس از واسنجی

در شکل ۳ توزیع مکانی مقادیر پارامترهای بهینه شده در سناریوی ۲ و در جدول ۳ نیز مقادیر بهینه این پارامترهای مربوط به اجرای سناریوهای ۱ و ۳ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مقادیر پارامترهای مدل در بخش‌های مختلف حوضه دارای مقادیر متفاوتی می‌باشند که همین مساله بر روی نحوه تولید رواناب، رطوبت، تبخیر و تعرق در بخش‌های مختلف حوضه تأثیرگذار است. به عنوان مثال، بالا بودن مقدار پارامتر b_{inf} در سلول‌های واقع در شمال-غربی حوضه سفیدرود به معنی کاهش سهم نفوذ و افزایش رواناب می‌باشد و در این در حالی است که مقدار نفوذ در بخش‌های دیگر بیشتر می‌باشد. همچنین پارامتر d_3 که مبین عمق لایه سوم ستون خاک در هر سلول می‌باشد، در بخش‌های مرکزی، شمالی و شمال-غربی حوضه از مقدار بیشتری برخوردار بوده و به همین علت

Table 2- The statistical indexes which are used in this study

جدول ۲- شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش

Statistical Index	Formula
Correlation Coefficient	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}}$
Nash-Sutcliffe	$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$
Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}$

در جدول فوق Q_{obs} : مقادیر مشاهداتی، Q_{sim} : مقادیر شبیه‌سازی، n : تعداد داده‌ها، \bar{Q}_{obs} : متوسط مقادیر مشاهداتی، \bar{Q}_{sim} : متوسط مقادیر شبیه‌سازی می‌باشد.

Table 3- Calibrated parameters of VIC-3L model in scenarios 1 and 3

جدول ۳- پارامترهای واسنجی شده مدل VIC-3L در سناریوهای ۱ و ۳

Number of scenario	d_3 (m)	d_2 (m)	C	W_s	D_s^{max} (mm/day)	D_s	b_{inf}
Scenario 1	1.36	0.69	2.00	0.68	29.7	0.87	0.12
Scenario 3	0.73	0.67	1.12	0.68	8.0	0.52	0.07

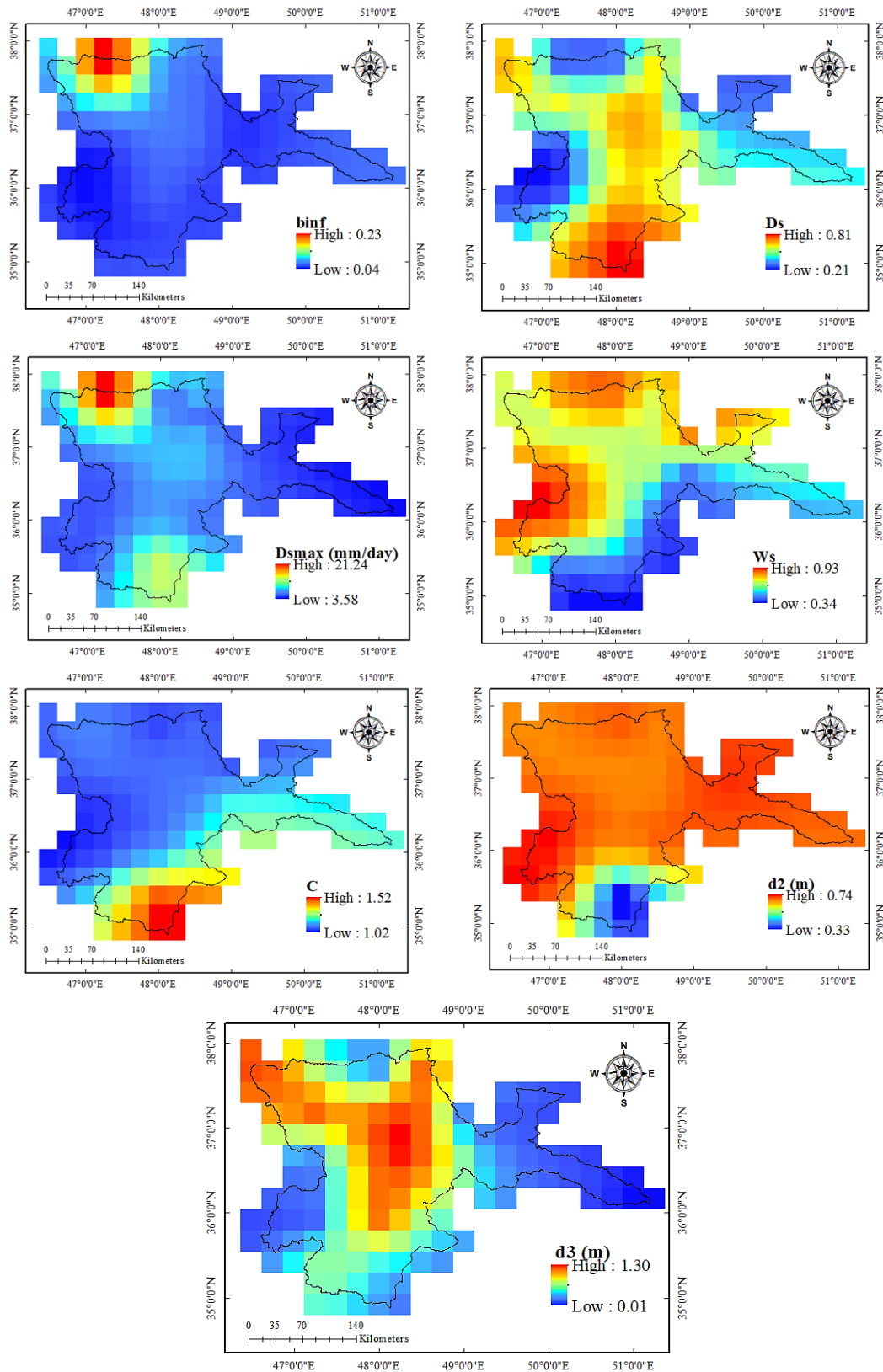


Fig. 3- Spatial distribution of calibrated parameters of VIC-3L model (Scenario 2)

شکل ۳- توزیع مکانی پارامترهای واسنجی شده مدل VIC-3L (سناریو ۲)

رطوبت سطحی خاک مستقیماً تحت تأثیر مقدار ثابت دی الکتریک محیط قرار می‌گیرند. از آنجایی که اختلاف زیادی میان ثابت دی الکتریک آب (حدود ۸۱) و خاک خشک (بین ۴ تا ۷) وجود دارد، مقدار این شاخص و ضریب پس انتشار با افزایش رطوبت خاک رو به افزایش خواهد بود (Babaeian et al., 2013). بنابراین پس از رخداد جریان‌های با دبی بالا، سنجنده ماهواره با بیش‌برآورد زیادی در مقدار رطوبت سطحی خاک همراه است که این مسأله منجر به بیش‌برآوردی مقدار رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل VIC-3L شده است.

در نهایت برای بررسی عملکرد مدل VIC-3L در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان، متوسط درصد خطای مدل در تخمین دبی‌های بالا و حجم رواناب محاسبه گردید که نتایج حاصل از آن، در جدول ۴ نشان داده شده است.

همچنین در تمامی سناریوهای مورد استفاده مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی جریان همواره بالاتر از ۰/۷۴ می‌باشد که این خود نیز به خوبی گویای عملکرد مناسب سناریوهای مختلف است. همچنین با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌گردد که در صورت استفاده از منبع رطوبتی ASCAT (در دو سناریوی ۲ و ۳)، عملکرد مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی جریان‌های بالاتر از ۳۰۰ متر مکعب بر ثانیه کاهش یافته و این در حالی است که در سناریوی ۱ عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان تا دبی‌های کمتر از ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه قابل قبول می‌باشد. همچنین نکته حائز اهمیت دیگر در خصوص استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک، بیش‌برآوردی مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی رواناب در بازوی پایین‌رونده هیدروگراف (جریان‌های با دبی کم) می‌باشد. علت اصلی این مسأله را می‌توان چنین عنوان نمود که سنجنده‌های ماهواره‌ای اندازه‌گیری

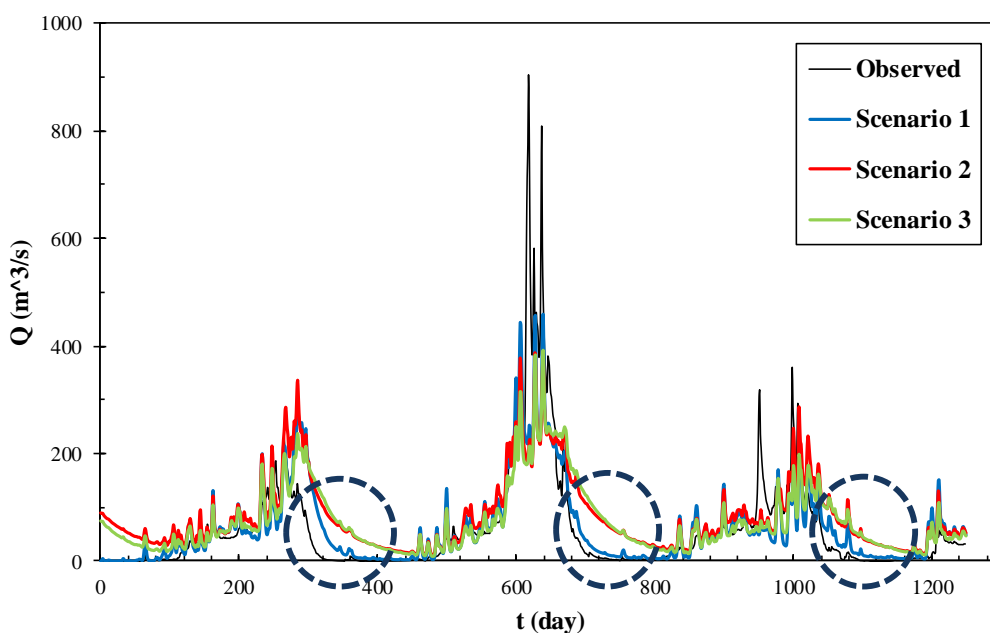


Fig. 4- Simulated and observed flow hydrographs (Daily time scale)
 شکل ۴- هیدروگراف‌های جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (در مقیاس روزانه)

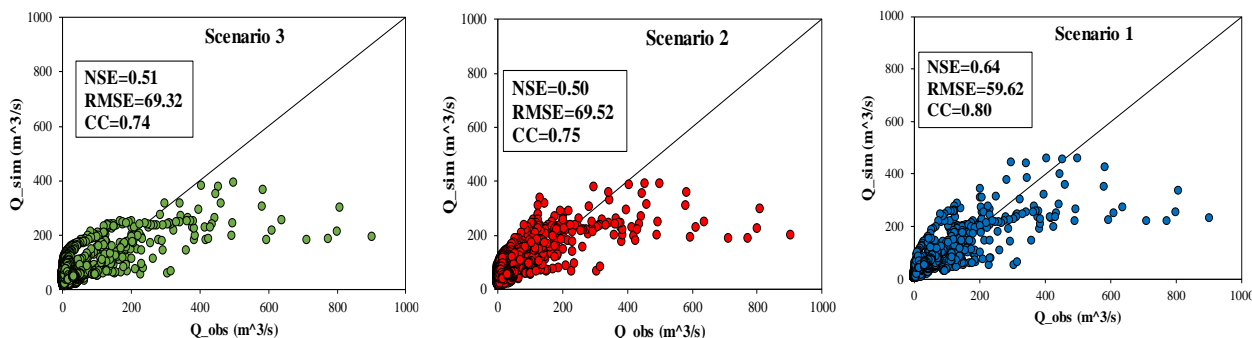


Fig. 5- Scatter plot of observed and simulated runoff at different scenarios
 شکل ۵- نمودار پراکنش رواناب شبیه‌سازی شده در سناریوهای مختلف و مقادیر مشاهداتی

توسط مدل از تطابق بسیار مناسبی با نتایج بدست آمده از منبع رطوبتی ASCAT برخوردار می‌باشد.

۳-۲-۲- مقیاس زمانی ماهانه

در این بخش به ارزیابی سناریوهای مختلف واسنجی مدل VIC-3L در مقیاس زمانی ماهانه پرداخته شده است (شکل ۷). همانطور که مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از داده‌های منبع رطوبتی ASCAT بمنظور واسنجی مدل هیدرولوژیکی VIC-3L، سری زمانی جریان شبیه‌سازی شده دارای ضریب همبستگی معادل ۰/۸۵ با داده‌های مشاهداتی می‌باشد. همچنین در سه سناریوی مورد بررسی، مقدار ضریب همبستگی بین رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و ضریب کارایی نش-ساتکلیف به ترتیب همواره بالاتر از ۰/۸۲ و ۰/۶۲ می‌باشد. به عبارت بهتر در مقیاس زمانی ماهانه عملکرد تمامی سناریوها قابل قبول بوده و مقادیر شبیه‌سازی شده جریان از همبستگی بسیار زیادی با داده‌های مشاهداتی برخوردار می‌باشند. مجدداً لازم بذکر است که به‌علت حساسیت بالای سنجنده‌های ماهواره‌ای به شرایط رطوبتی محیط، استفاده از داده‌های سنجش از دور رطوبت خاک پس از وقوع جریان‌های بزرگ، تا مدتی (تا تخلیه رواناب و خشک شدن حوضه) با بیش‌برآوردی در رطوبت خاک و متعاقب آن بیش‌برآوردی در مقدار رواناب همراه خواهد بود. در شکل ۸ نیز میزان خطای نسبی مدل VIC-3L در شبیه‌سازی دبی‌های بالا و حجم رواناب در سناریوهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل، سناریوی ۱ و ۳ به ترتیب با دارا بودن خطای نسبی معادل ۳/۲ و ۲۷/۵ درصد دارای بهترین و بدترین عملکرد در برآورد حجم رواناب می‌باشند.

Table 4- The percentage error of model in estimation of high flows and runoff volume at different scenarios (Daily time scale)

جدول ۴- درصد خطای نسبی در برآورد دبی‌های بالا و حجم رواناب در سناریوهای مختلف (در مقیاس روزانه)

Number of scenario	Average Relative Error	
	Q_peak	Volume runoff
Scenario 1	57.7	3.25
Scenario 2	53.1	38.47
Scenario 3	60.0	25.62

نتایج گویای این مطلب است که مدل هیدرولوژیکی VIC-3L با دارا بودن متوسط خطای نسبی بیش از ۵۰ درصد از عملکرد مناسبی در تخمین دبی‌های بالا در هر ۳ سناریو برخوردار نمی‌باشد که با توجه به ماهیت مدل و اینکه یک مدل هیدرولوژیکی بیلان به‌شمار می‌رود، این اتفاق دور از انتظار نمی‌باشد. اما در خصوص حجم رواناب، استفاده از مقادیر جریان ثبت شده بمنظور واسنجی این مدل (سناریو ۱)، منجر به عملکرد مناسبی در تخمین حجم رواناب در مقیاس زمانی روزانه شده است به‌نحوی که مقدار خطای برآورد حجم رواناب در این سناریو برابر با ۳/۲۵ درصد می‌باشد. در صورتی که با توجه به نتایج، استفاده از تصاویر رطوبت سطحی خاک بر اساس سناریو ۳ منجر به ایجاد خطایی در حدود ۲۵/۶ درصد در تخمین حجم رواناب می‌گردد. به منظور عدم ارائه نتایج مربوط به رطوبت سطحی خاک بدست آمده از منبع رطوبت ASCAT و شبیه‌سازی شده توسط مدل برای تمامی سلول‌های محاسباتی، متوسط مقادیر رطوبت سطحی خاک بهینه شده در سطح حوضه محاسبه گردید که نتایج مربوطه در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، رطوبت سطحی واسنجی شده

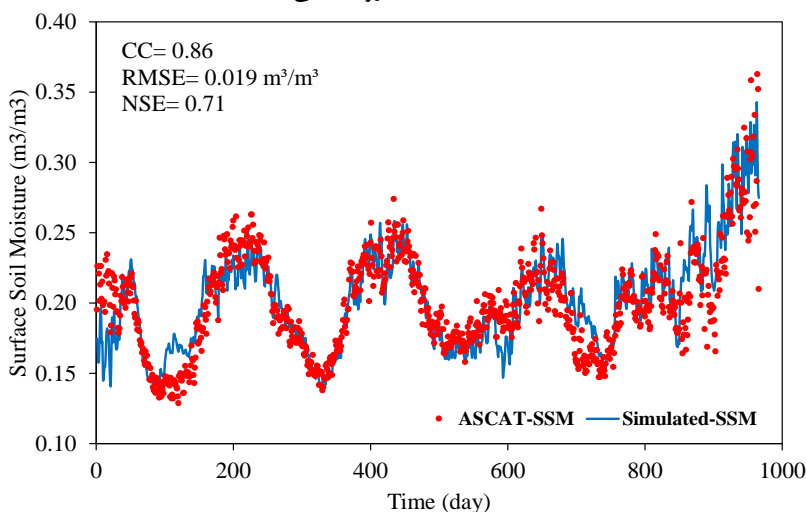


Fig. 6- Basin-averaged of optimized surface soil moisture using ASCAT product over the Sefidrood river basin

شکل ۶- متوسط رطوبت سطحی خاک بهینه‌سازی شده با استفاده از منبع رطوبتی ASCAT در سطح حوضه سفیدرود

همچنین همانطور که مشاهده می‌شود در سناریوی ۲ حجم رواناب با خطای ۱۷/۲ درصد شبیه‌سازی شده است. در برآورد دبی‌های بالا نیز اگرچه تمامی سناریوها خطایی بیش از ۲۰ درصد را بدست می‌دهند اما عملکرد سناریوی ۲ نسبت به دیگر سناریوها مناسب‌تر ارزیابی می‌شود.

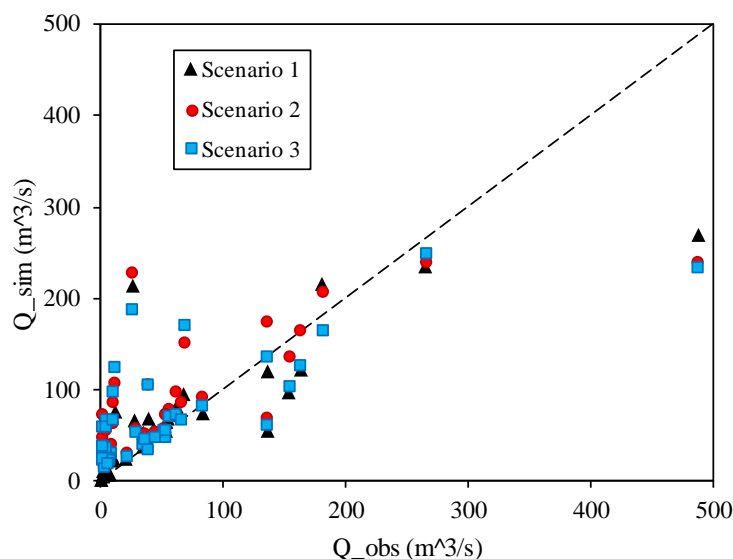


Fig. 7- Simulated runoff at different scenarios versus observed flow (at monthly time scale)
 شکل ۷- جریان شبیه‌سازی شده در سناریوهای مختلف در مقابل مقادیر مشاهداتی (در مقیاس ماهانه)

Table 5- Statistics indexes of different scenarios (Monthly time scale)
 جدول ۵- شاخص‌های آماری در سناریوهای مختلف اجرای مدل VIC-3L (در مقیاس ماهانه)

Number of scenario	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
NSE	0.79	0.65	0.62
RMSE (cms)	57.11	63.68	62.42
CC	0.92	0.85	0.82

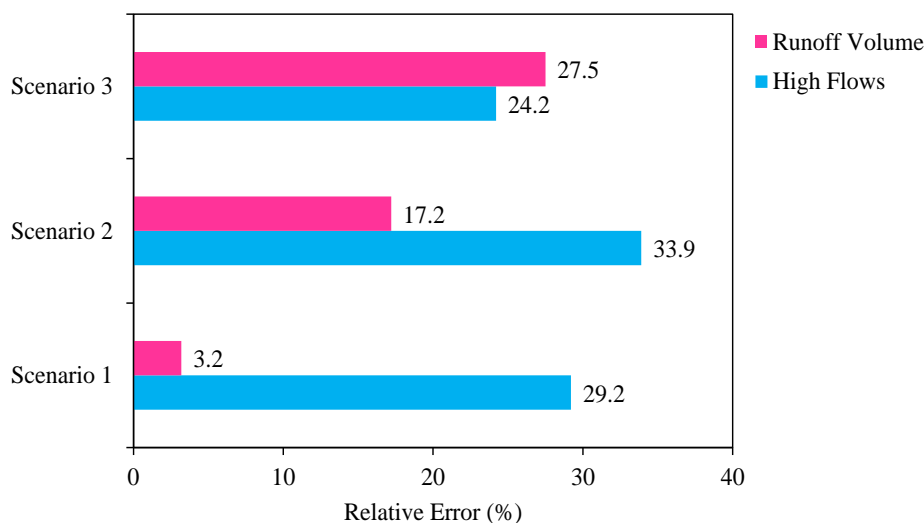


Fig. 8- The percentage error of model in estimation of high flows and runoff volume at different optimization scenarios (At monthly time scale)

شکل ۸- درصد خطای نسبی برآورد دبی‌های بالا و حجم رواناب در سناریوهای مختلف بهینه‌سازی مدل VIC-3L (در مقیاس ماهانه)

- 1- Surface Soil Moisture
- 2- Soil Wetness Index
- 3- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
- ⁴- Technology University of Wien
- 5- Change Detection Method (CMD)
- 6- Soil Water Retrieval Package

۵- مراجع

- Albergel C, Rüdiger C, Carrer D, Calvet J C, Fritz N, Naeimi V, Bartalis Z, Hasenauer S (2009) An evaluation of ASCAT surface soil moisture products with in-situ observations in Southwestern France. *Hydrology and Earth System Sciences* 13:115-124
- Azizian A, Shokoohi A R (2017) Evaluating and sensitivity analysis of a macro scale hydrological model (VIC-3L) for simulation of stream flow at different time scales. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 47:39-52
- Babaeian E, Homaee M, Noroozi A A (2013) Estimation of surface soil moisture using ENVISAT/ASAR radar images. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 27:(In Persian)
- Brocca L, Hasenauer S, Lacava T, Melone F, Moramarco T, Wagner W, Dorigo W, Matgen P, Martínez-Fernández J, Llorens P, Latron J, Martin C, Bittelli M (2011) Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe. *Remote Sensing of Environment* 115:3390-3408
- Brocca L, Melone F, Moramarco T, Wagner W, Naeimi V, Bartalis Z, Hasenauer S (2010) Improving runoff prediction through the assimilation of the ASCAT soil moisture product. *Hydrology and Earth System Sciences* 14:1881-1893
- Brocca L, Morbidelli R, Melone F, Moramarco T (2007) Soil moisture spatial variability in experimental areas of Central Italy. *Journal of Hydrology* 333:356-373
- Daly E, Porporato A, (2005) A review of soil moisture dynamics: From rainfall infiltration to ecosystem response. *Environmental Engineering Science* 22:9-24
- Dorigo W A, Gruber A, DeJeu R A M, Wagner W, Stacke T, Loew A, Albergel C, Brocca L, Chung D, Parinussa R M, Kidd R (2015) Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment* 162:380-395
- Draper C, Walker J P, Steinle P J, DeJeu R A, Holmes R T (2009) An evaluation of AMSR-E derived soil

اندازه گیری مقدار جریان خروجی از حوضه های آبریز بمنظور مدیریت صحیح منابع آب به ویژه در حوضه های فاقد جریان ثبت شده (یا دارای آمار کم)، به یکی از دغدغه های اصلی محققین و مهندسين بدل شده است. تاکنون مطالعات میدانی مختلفی در خصوص بررسی دقت منابع ماهواره ای در تخمین رطوبت سطحی خاک در بخش های مختلف دنیا صورت پذیرفته است؛ اما در زمینه کاربرد این منابع اطلاعاتی ارزشمند در مدل سازی هیدرولوژیکی و بهبود عملکرد آنها مطالعات به نسبت کمتری گزارش شده است. حتی به جرأت می توان چنین عنوان نمود که در حال و در سطح کشور ایران تاکنون مطالعه ای در زمینه استفاده از داده های رطوبت سنجش از دوری جهت شبیه سازی و واسنجی مدل های هیدرولوژیکی به انجام نرسیده است. لذا با توجه به توضیحات فوق، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی تصاویر رطوبت سطحی خاک منبع ASCAT در واسنجی مدل هیدرولوژیکی VIC-3L (جهت شبیه سازی رواناب) در دو گام زمانی روزانه و ماهانه در سطح حوضه آبریز سفیدرود صورت پذیرفته است. نتایج بدست آمده در مقیاس های زمانی مذکور حاکی از عملکرد قابل قبول منبع رطوبتی ASCAT در واسنجی مدل توزیعی VIC-3L و نیز شبیه سازی جریان خروجی از حوضه می باشد. طبق محاسبات صورت گرفته در مقیاس زمانی روزانه، ضریب کارایی نش-ساتکلیف و ضریب همبستگی بین جریان شبیه سازی شده توسط مدل در صورت استفاده از داده های رطوبتی ASCAT به ترتیب معادل ۰/۵۸ و ۰/۷۵ می باشد و این در حالی است که در صورت استفاده از داده های جریان مشاهداتی برای واسنجی مدل، مقادیر شاخص های مذکور به ترتیب معادل ۰/۶۴ و ۰/۸۰ می باشد. همچنین در مقیاس زمانی ماهانه، استفاده از داده های رطوبت ماهواره ای موجب افزایش عملکرد مدل در شبیه سازی رواناب شده است به طوری که مقدار ضریب نش-ساتکلیف و نیز ضریب همبستگی به ترتیب در حدود ۰/۶۵ و ۰/۸۵ بدست آمده است. همانطور که ملاحظه می گردد، میزان همبستگی بین داده های جریان شبیه سازی شده با استفاده از داده های رطوبت ماهواره ای و مقادیر مشاهداتی بسیار بالا بوده و همین مساله ارزش و کارایی این منبع اطلاعاتی ارزشمند را نشان می دهد. همچنین لازم بذکر است که به علت حساسیت بالای سنجنده های ماهواره ای به شرایط رطوبتی محیط، استفاده از داده های سنجش از دور رطوبت خاک پس از وقوع جریان های بزرگ، تا مدتی (تا تخلیه رواناب و خشک شدن حوضه) با بیش برآوردی در رطوبت خاک و متعاقب آن بیش برآوردی در مقدار رواناب همراه خواهد بود. بطور کلی نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان داد که استفاده از منابع سنجش از دوری رطوبت سطحی خاک می تواند در شبیه سازی جریان خروجی از حوضه مفید باشد.

- moisture data in the REMEDHUS network (Spain). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50:1602-1611
- Shayeghi A, Azizian A, Brocca L (2019) Evaluating the efficiency of reanalysis and remote-sensing based rainfall data sets for hydrological modeling using VIC-3L large scale model. *Iran-Water Resources Research* 15:50-60 (In Persian)
- Sivapalan M (2003) Prediction in ungauged basins: A grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes* 17:3163-3170
- Wagner T, Montanari A (2011) Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins. *Water Resources Research* 47:W06301
- Wagner W, Lemoine G, Borgeaud M, Rott H (1999a) A study of vegetation cover effects on ERS scatterometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37:938-948
- Wagner W, Lemoine G, Rott H (1999b) A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sensing of Environment* 70:191-207
- Wagner W, Naeimi V, Scipal K, Jeu R, Martínez-Fernández J (2007) Soil moisture from operational meteorological satellites. *Hydrogeology Journal* 15:121-131
- Wagner W, Noll J, Borgeaud M, Rott H (1999c) Monitoring soil moisture over the Canadian prairies with the ERS scatterometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37:206-216
- Wanders N, Bierkens M F P, Jong S M, et al (2014) The benefits of using remotely sensed soil moisture in parameter identification of large-scale hydrological models. *Water Resources Research* 50:5329-5333
- Zeng J, Li Z, Chen Q, Bi H (2015) Method for soil moisture and surface temperature estimation in the tibetan plateau using spaceborne radiometer observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 12:97-101
- Zhao R, Zhuang Y, Fang L, Liu X, Zhang Q (1980) The xinjiang model, hydrological forecasting. *Proceedings Oxford Symposium IASH* 129:351-356
- moisture over Australia. *Remote Sensing of Environment* 113:703-710
- Guo J, Liang X, Leung L (2004) Impacts of different precipitation data sources on water budgets. *Journal of Hydrology* 298:311-334
- Famiglietti J S, Ryu D, Berg A A, Rodell M, Jackson T J (2008) Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resources Research* 44:1-16
- Koster R.D, Dirmeyer P A, Guo Z, Bonan G, Chan E, Cox P, et al. (2004) Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science* 305:1138-1140
- Legates D R, Mahmood R, Levia D F, DeLiberty T L, Quiring S M, Houser C, et al. (2011) Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography* 35:65-86
- Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, Burges S (1994) A simple hydrologically based of land-surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 99:14415-14428
- Liang X, Wood E F, Lettenmaier D P (1996) Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification. *Global Planetary Change* 13:195-206
- Liu Y, Wang W, Liu Y (2018) ESA CCI Soil moisture assimilation in SWAT for improved hydrological simulation in upper Huai River Basin. *Advances in Meteorology* 2018:27-31
- López López P, Wanders N, Schellekens J, et al. (2016) Improved large-scale hydrological modelling through the assimilation of streamflow and downscaled satellite soil moisture observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 20:3059-3076
- Naeimi V, Scipal K, Bartalis Z, Hasenauer S, Wagner W (2009) An improved soil moisture retrieval algorithm for ERS and METOP scatterometer observations. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 47:1999-2013
- Reichle R H, Koster R D (2004) Bias reduction in short records of satellite soil moisture. *Geophysical Research Letters* 31
- Sánchez N, Martínez-Fernánadez J, Scaini A, Pérez-Gutierrez C (2012) Validation of the SMOS L2 soil