



Evaluating the Efficiency of Reanalysis and Remote-Sensing Based Rainfall Data Sets for Hydrological Modeling Using VIC-3L Large Scale Model

(Case Study: SefidRood Catchment)

A. Shayeghi¹, A. Azizian^{2*}, and L. Brocca³

Abstract

According to the quick developments of satellite-based technologies and the computer's computational power, several rainfall datasets have been developed with different spatial and temporal resolutions. These datasets usually are based on remote-sensing techniques or the combination of land surface models (LSMs) and general circulation models (GCMs). This research addressed the efficiency of ECMWF and PERSIAN reanalysis dataset for hydrological modeling using VIC-3L large-scale model over the SefidRood catchment. The results of statistical analyses at daily time scale indicated that the correlation coefficient (CC) between ECMWF and PERSIAN and ground-observed dataset is about 0.83 and 0.48, respectively. In addition, at monthly time scale, the performances of both rainfall datasets are approximately the same and in most parts of the catchment with the value of CC higher than 0.80. Hydrological analyses by VIC-3L model showed that despite having low efficiency in estimating rainfall, the PERSIAN dataset led to better simulation of runoff compared to ECMWF. For example, the Nash-Sutcliffe (NS) coefficient between daily and monthly simulated runoff using PERSIAN and observed runoff at the outlet of SefidRood catchment were about 0.80 and 0.88, respectively, while in the case of ECMWF these coefficients were respectively about 0.67 and 0.72. Moreover, by using the PERSIAN dataset, the performance of the VIC model in simulating daily and monthly peak flows increased significantly.

Keywords: Rainfall, Remote-Sensing Technique, Hydrological Modeling, VIC-3L, Runoff.

Received: September 26, 2018

Accepted: December 1, 2018

ارزیابی کارایی منابع بارشی بازتحلیل شده و مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور جهت مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل بزرگ مقیاس VIC-3L (حوضه مورد مطالعه: حوضه آبریز سفیدرود)

افشین شایقی^۱، اصغر عزیزیان^{۲*} و لوکا بروکا^۳

چکیده

باتوجه به گسترش روز افزون تکنولوژی‌های ماهواره‌ای و قدرت محاسبات رایانه‌ای، پایگاه‌های بارشی با توان تفکیک زمانی و مکانی مختلفی ایجاد شده است که بر خلاف ایستگاه‌های زمینی دارای پوشش مکانی بسیار زیادی می‌باشند. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی پایگاه‌های بارشی بازتحلیل شده ECMWF و PERSIAN جهت مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل بزرگ مقیاس VIC-3L در حوضه آبریز سفیدرود پرداخته شده است. نتایج حاصل از ارزیابی آماری حاکی از آن است که در مقیاس زمانی روزانه پایگاه ECMWF با دارا بودن ضریب همبستگی معادل ۰/۸۳ با داده‌های زمینی از عملکرد بسیار بهتری نسبت به پایگاه PERSIAN برخوردار می‌باشد. هر چند در مقیاس زمانی ماهانه هر دو پایگاه بارشی مذکور دارای عملکرد تقریباً مشابهی می‌باشند و در بیشتر بخش‌های حوضه دارای ضریب همبستگی بالای ۰/۸ با داده‌های زمینی هستند. همچنین نتایج حاصل از اجرای مدل هیدرولوژیکی نشان داد که علی‌رغم پایین بودن توان پایگاه PERSIAN در تخمین بارش در سطح حوضه، عملکرد آن در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان خروجی از حوضه در هر دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه نسبت به پایگاه ECMWF بسیار بهتر می‌باشد. به عنوان مثال، ضریب کارائی نش-ساتکلیف (NS) بدست آمده در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه در صورت استفاده از داده‌های PERSIAN به ترتیب در حدود ۰/۸۰ و ۰/۸۸ می‌باشد و این در حالی است که در صورت استفاده از داده‌های ECMWF مقادیر مذکور به ترتیب معادل ۰/۶۷ و ۰/۷۲ خواهد بود. همچنین در صورت استفاده از داده‌های PERSIAN میزان خطای مدل هیدرولوژیکی در برآورد دبی‌های اوج (جریان‌ات با دبی بالا) هیدروگراف جریان تا مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بارش، تکنیک سنجش از دور، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدل بزرگ مقیاس VIC-3L، رواناب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۷/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۹/۱۰

1- M.Sc. in Water Resources Engineering, Water engineering Dept., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Assistant Professor, Water engineering Dept., 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- دانش‌آموخته 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 ژئو هیدرولوژی IRPI و عضو هیئت علمی دانشگاه پروجا.

*- نویسنده مسئول

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

Nijseen et al., 1997; Nijssen et al., 2001; (Grasselt et al., 2008; Azizian and Shokoochi, 2017). از میان مؤلفه‌های مهم اقلیمی، بارش باران به علت دارا بودن تغییرات مکانی و زمانی معنی‌دار، همواره از اهمیت بسیار زیادی در مطالعات منابع آب، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و پیش‌بینی سیلاب برخوردار می‌باشد (Bohnenstengel et al., 2011; Bajracharya et al., 2014;) (Kumar et al., 2015; Sahlu et al., 2017). همچنین این مؤلفه به عنوان مهم‌ترین ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی سطح زمین (LSMs) بشمار می‌آید که به واسطه تغییرات زمانی و مکانی، رابطه بین بارش و رواناب را به پیچیده‌ترین پدیده هیدرولوژیکی تبدیل می‌نماید. در نتیجه تخمین صحیح این مؤلفه برای رسیدن به نتایج هیدرولوژیکی قابل اعتماد، امری ضروری بوده و کمترین خطایی در برآورد مقدار بارش می‌تواند منجر به خطای معنی‌داری در مقدار رواناب شبیه‌سازی شده ایجاد نماید. در حال حاضر بخش‌های عمده‌ای از جهان به ویژه کشورهای در حال توسعه، با چالش عدم دسترسی به اطلاعات زمینی کافی و عدم وجود ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی (ایستگاه‌های بارانسنجی)، روبرو هستند (Hargreaves and Samani, 1985; Hughes et al., 2006; Sue et al., 2008; Worqlul et al., 2017). ظهور تکنولوژی‌های ماهواره‌ای و تهیه محصولات بارشی با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا توسط پایگاه‌های داده مختلف، پنجره‌ای جدید را برای محققین در زمینه‌های مختلف از جمله مدل‌سازی هیدرولوژیکی در حوضه‌های فاقد آمار، باز نموده است. این محصولات عمدتاً به صورت شبکه‌بندی شده هستند و اگرچه بر خلاف ایستگاه‌های بارانسنجی زمینی، دارای مشکل عدم پیوستگی مکانی و زمانی نمی‌باشند ولی به دلیل عدم قطعیت‌هایی که در تخمین بارش دارند (Greene and Morrissey, 2000; Steiner et al., 2009; Hong et al., 2006; AghaKouchak et al., 2003)، بدون ارزیابی اولیه نمی‌توان از این محصولات استفاده نمود. لذا برای مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی استفاده از این پایگاه‌های داده نیازمند یک سری بررسی‌های اولیه می‌باشد. پایگاه داده‌های بارشی مذکور را می‌توان در سه دسته کلی داده‌های مدل مینا (Moreau et al., 2003; Dee et al., 2011; Kidd et al., 2013; Krogh et al., 2015; De Leeuw et al., 2015; Balsamo et al., 2015; Raziei and Zhao and Fu, 2006;)، ایستگاه مینا (Sotodeh, 2017; Tianobo et al., 2006; Morice et al., 2012; Harris et al., 2015; Harris et al., 2013) و مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور (Javanmard et al. 2010; Katiraie-Boroujerdy, 2013;) Li et al., 2013; Zhao and Yatagai, 2014; Tong et al., 2014; Krogh et al., 2015; Tan et al., 2015; Ghajarnia et al., 2015; Moazami et al., 2016; Dembele and Zwart, 2016; Duan et al., 2016; Ashouri et al., 2016) تقسیم نمود. عمده مطالعاتی که در سطح کشور به انجام رسیده است، عمدتاً با

رشد روز افزون جمعیت شهرها و تمرکز فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، افزایش نیاز به آب برای مصارف مختلف را در بسیاری از نقاط جهان و ایران به همراه داشته است. افزایش نیازها، بروز خشکسالی‌های مکرر و محدودیت استفاده مجدد از حجم قابل توجهی از منابع آب به دلیل آلودگی‌ها و محدودیت‌های زیست محیطی، نیاز به برنامه‌ریزی دقیق‌تر در مدیریت منابع آب را می‌طلبد. با توجه به محدودیت جریان رودخانه‌های کشور و وابستگی نیازهای آبی به جریان سطحی، برآورد جریان رودخانه‌ها از مهم‌ترین عوامل تصمیم‌گیری جهت مدیریت بهینه بهره‌برداری از رودخانه‌ها می‌باشد (Xie et al., 2007). به طوری که مشکل اکثر سیستم‌های بهره‌برداری از رودخانه‌ها چه به صورت ذخیره‌ای (سدها) و چه به صورت مستقیم (بند انحرافی)، ایستگاه پمپاژ) ناشی از عدم دقت در تخمین مقدار جریان رودخانه است. به عبارت دیگر مشکل اساسی در این راستا برآورد دقیق و یا حداقل نزدیک به دقیق میزان آورد رودخانه می‌باشد چرا که برآورد جریان رودخانه در یک حوضه آبریز به دلیل پیچیدگی سیستم از نظر ورودی‌ها، خروجی‌ها و عوامل مرتبط با آن مانند بارش، تبخیر، پوشش گیاهی، توپوگرافی، نفوذ و نوع سازندها بسادگی امکان‌پذیر نیست.

وجود عوامل اقلیمی (داده‌های هواشناسی)، سطح زمینی (پوشش گیاهی، خاکشناسی)، هیدرولوژیکی مؤثر در ایجاد جریان رودخانه و ارتباطات پیچیده و غیرخطی آنها نیاز به مدل جامعی را جهت تحلیل این پدیده به ویژه در حوضه‌های بزرگ مقیاس آشکار می‌سازد. لذا استفاده از فرآیند مدل‌سازی که بتواند چرخه هیدرولوژیکی را با در نظر گرفتن متغیرهای غالب هواشناسی، خاک‌شناسی، گیاه‌شناسی و هیدرولوژیکی دخیل در این چرخه به طور کامل شبیه‌سازی نماید، از اهمیت چشمگیری برخوردار می‌باشد (Su et al., 2017). در دهه‌های اخیر مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس متعدد و مختلفی توسعه داده شده است که از میان آنها مدل ظرفیت نفوذ متغیر^۱ به علت تحلیل و بکارگیری اغلب روابط و پارامترهای مؤثر در پدیده رواناب سطحی و زیرسطحی توجه زیادی را به خود معطوف کرده است. همچنین، اهمیت مؤلفه‌های حاصل از مدل VIC مانند برخی از مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی، توزیع دمای خاک، توزیع رطوبت خاک، تبخیر- تعرق حاکی از ضرورت استفاده از مدل‌های سطح زمین مانند مدل VIC می‌باشد (Gao et al., 2009). مدل VIC از دقت قابل توجهی در توصیف دقیق فرایندهای مربوط به تفکیک میزان بارش به رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی، تبخیر- تعرق و تابش خالص به شار گرمای نهان، محسوس، زمینی در مقیاس‌های زمانی و مکانی با قدرت تفکیک بالا برخوردار می‌باشد (Xie et al., 2007;)

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساختار مدل VIC-3L

نسخه اولیه مدل VIC با الگوبری از مدل Xinanjiang و به صورت یک لایه خاک توسط Wood et al. (1992) ارائه شد و در مدل GFDL و مدل GCM انستیتوی ماکس پلانک مورد استفاده قرار گرفت (Stamm et al., 1994) و تاکنون نسخه‌های به روز شده زیادی (Cherkauer et al., 2003; Bowling et al., 2004; Lettenmaier and Bowling, 2009) از آن ایجاد و در محدوده وسیعی از موضوعات مختلف مانند مدیریت منابع آب حوضه‌ها، اندرکنش بین زمین و اتمسفر، تغییر اقلیم، مدل‌سازی رطوبت خاک و شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه‌ها به کار گرفته شده است. این مدل که در رده مدل‌های سطح زمین قرار می‌گیرد، محدوده موردنظر را به تعدادی شبکه با توان تفکیک مشخص تقسیم می‌نماید. هر کدام از این سلول‌ها به صورت کاملاً مستقل از یکدیگر شبیه‌سازی می‌شوند و در نهایت توسط یک ماژول روندیابی، جریان خروجی از هر سلول جمع‌آوری و به خروجی حوضه هدایت می‌شود. ویژگی‌های بارز مدل VIC را می‌توان به نحوه در نظر گرفتن تغییرات پوشش گیاهی در یک سلول، در نظر گرفتن چند لایه خاک با مقادیر نفوذ متغیر و محاسبه دبی پایه به صورت تابع غیرخطی ارتباط داد. در شکل ۱ نمایش شماتیک از عملکرد مدل VIC جهت شبیه‌سازی و روندیابی رواناب نشان داده شده است.

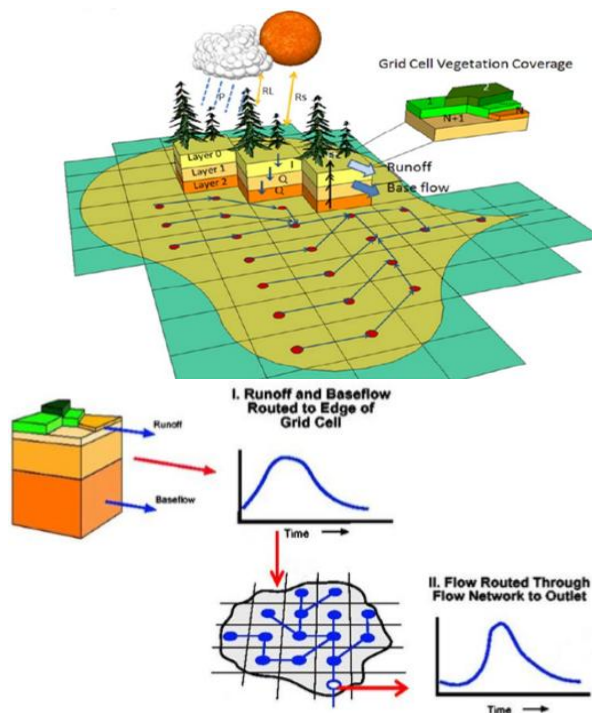


Fig. 1- Schematic representation of VIC-3L large scale model

شکل ۱- نمایش شماتیک از مدل بزرگ مقیاس VIC-3L

استفاده از داده‌های بدست آمده از پایگاه‌های ایستگاه مبنا و مبتنی بر سنجش از دور بوده و تاکنون کمتر به ارزیابی داده‌های پایگاه بارشی مدل مبنا مانند ECMWF به ویژه با رویکرد کاربرد در مدل‌سازی هیدرولوژیکی پرداخته شده است. همچنین مطالعات گذشته بر روی پایگاه‌های بارشی همچون TRMM، PERSIAN، APHRODITE و غیره غالباً به ارزیابی عملکرد آنها در تخمین بارش محدوده شده و کارایی آنها در تخمین مؤلفه‌های هیدرولوژیکی ارزشمندی همچون: رطوبت خاک، رواناب سطحی/ زیرسطحی، دبی پایه و جریانات سیلابی مدنظر قرار نگرفته است.

باتوجه به وسعت روزافزون استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور در اندازه‌گیری و پیش‌بینی بارش و همچنین سایر پارامترهای ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس در سطح جهان، متأسفانه تاکنون در کشور ما علیرغم اینکه در بسیاری از حوضه‌ها از نظر تعداد شبکه‌های ایستگاه‌های بارانسنجی بسیار فقیر بوده و امکان اندازه‌گیری دقیق بارندگی، پارامترهای پوشش گیاهی و توزیع زمانی و مکانی آنها وجود ندارد، از داده‌های ماهواره‌ای استفاده مؤثری صورت نگرفته است. از جمله مهم‌ترین و معدودترین پژوهش‌هایی که در زمینه کاربرد داده‌های ماهواره‌ای بارش برای شبیه‌سازی رواناب به انجام رسیده است، می‌توان به تحقیقات (Haji Hosseini et al., 2014) Eini et al. (2018)، (Abdullahi et al., 2015) و (Parisuj et al., 2018) اشاره نمود. در پژوهش‌های مذکور عمدتاً عملکرد یک مدل بارش- رواناب یکپارچه مانند: IHACRES یا SWAT مورد بررسی قرار گرفته و به جرات می‌توان گفت که تاکنون عملکرد یک مدل توزیعی نسبت به پایگاه‌های بارش ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار نگرفته است. لذا با توجه به توضیحات فوق، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی پایگاه‌های بارشی مدل مبنا و مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور جهت مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل بزرگ مقیاس VIC-3L در حوضه آبریز سفیدرود پرداخته شده است. این حوضه با وسعتی در حدود ۶۱۰۰۰ کیلومترمربع و نیز دارا بودن تنوع اقلیمی و توپوگرافیکی مختلفی یکی از مهمترین حوضه‌های آبریز کشور به‌شمار می‌آید. یکی از علت‌های اصلی انتخاب مدل مذکور که جزئیات مربوط به آن در بخش‌های بعدی شرح داده شده است، ساختار توزیعی (Distributed) آن جهت شبیه‌سازی رواناب و لزوم ورود داده‌ها به صورت شبکه‌بندی شده (Gridded) می‌باشد. همچنین با توجه به وجود پایگاه‌های بارشی مختلف، در این پژوهش از پایگاه‌های ECMWF و PERSIAN به عنوان پرکاربردترین منابع بارشی مدل مبنا و مبتنی بر تکنیک سنجش از دور استفاده بعمل آمده است.

Franchini and Pacciani (1991) ARNO (توسعه داده شده توسط) می‌باشد. با تجمیع جریانات زیرسطحی و سطحی، مقدار دبی کل خروجی از هر سلول (Q) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q = \sum_{n=1}^{N+1} C_n (Q_{d,n} + Q_{b,n}) \quad (3)$$

در رابطه فوق، $Q_{d,n}$ ، $Q_{b,n}$ و C_n به ترتیب جریان سطحی، جریان زیرسطحی و درصد مربوط به پوشش گیاهی n ام در هر سلول می‌باشند. به عبارت بهتر متناسب با هر پوشش گیاهی جریان سطحی و زیرسطحی محاسبه و با مقادیر متناظر بدست آمده از پوشش‌های گیاهی موجود در آن سلول جمع می‌گردد. برای مدل‌سازی فرآیند انتقال رطوبت بین لایه‌های خاک مدل VIC از معادله یک بعدی ریچاردز که به شرح زیر می‌باشد، استفاده می‌نماید:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial D(q)}{\partial z} + \frac{\partial K(q)}{\partial z} \quad (4)$$

در رابطه فوق، Θ : محتوی رطوبتی خاک، $D(\Theta)$: ضریب پخشیدگی رطوبت در خاک، $K(\Theta)$: ضریب هدایت هیدرولیکی خاک و z : عمق خاک می‌باشد که مقدار آن در لایه‌های مختلف متفاوت است. برای آشنایی با جزئیات مربوط به الگوریتم‌های مربوط به مدل‌سازی رطوبت و رواناب زیرسطحی مورد استفاده در مدل VIC به Liang et al. (1994) و Azizian and Shokoochi (2017) مراجعه شود. در نهایت مقادیر رواناب سطحی و زیرسطحی (سری زمانی جریان) بدست آمده در هر سلول با استفاده از روش روندیابی ارائه شده توسط Lohmann et al. (1996) جمع‌آوری شده و سری زمانی جریان در خروجی حوضه (محل ایستگاه هیدرومتری) بدست خواهد آمد.

۲-۲- محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز سفیدرود در محل تلاقی رشته کوه‌های البرز، زاگرس و مرکزی بین مختصات جغرافیایی $30^{\circ} 46' - 13^{\circ} 51'$ طول شرقی و $55^{\circ} 34' - 52^{\circ} 37'$ عرض شمالی قرار دارد. مساحت این حوضه آبریز در حدود 60494 کیلومترمربع است که حدوداً ۷۶ درصد آن را مناطق کوهستانی و ۲۴ درصد آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل می‌دهند. بخش جنوبی آن در دامنه‌های شمال غربی زاگرس قرار داشته و شامل حوضه آبریز قزل‌اوزن و تلوار می‌باشد. بخش میانی آن که در امتداد رشته کوه‌های مرکزی قرار داشته و به قله آتشفشانی سهند منتهی می‌شود، شامل حوضه آبریز رودخانه‌های زنجان، سحاس، قرنقو و آیدوغموش است. بخش شرقی آن نیز که شامل حوضه‌های آبریز فیروز آباد، طارم و شاهرود می‌باشد، در امتداد کوه‌های البرز واقع شده است. در این حوضه انواع مختلف مشخصه‌های توپوگرافی از جمله مناطق

مدل VIC توانایی اجرا در هر دو حالت بیلان انرژی و یا بیلان آب را دارا می‌باشد. در صورتی که مدل در حالت بیلان آب اجرا شود، بیلان انرژی سطح زمین محاسبه نخواهد گردید و در این حالت مدل فرض می‌کند که دمای سطح خاک با دمای هوا در گام زمانی موردنظر، یکسان می‌باشد. همانطور که عنوان شد، در مدل VIC هر سلول به طور جداگانه مدل شده و هیچگونه اندرکنش و یا انتقال جریانی بین سلول‌ها رخ نمی‌دهد. به عبارت دیگر این مدل تنها سری زمانی رواناب را که به طور غیر یکنواخت در هر سلول توزیع شده، محاسبه می‌نماید. در نتیجه برای انتقال جریان سطحی و دبی پایه به خارج از سلول و انتقال آن در شبکه آبراهه‌ها برای رسیدن به خروجی حوضه، بایستی از مدل روندیابی که توسط Lohman et al. (1998a, 1996) توسعه داده شده، استفاده نمود. در مدل روندیابی فرض بر این است که جریان آب هرگز از داخل آبراهه به داخل سلول وارد نمی‌شود. هنگامی که جریان موردنظر وارد آبراهه می‌شود، از چرخه هیدرولوژیکی و به عبارت بهتر از بیلان آبی سلول خارج می‌شود.

مدل VIC برای شبیه‌سازی بیلان آب در هر سلول از رابطه زیر استفاده می‌نماید:

$$\frac{dS}{dt} = P - E - R \quad (1)$$

در رابطه فوق، S : مقدار ذخیره آب در هر سلول، P : بارش، E : تبخیر و تعرق و R : رواناب می‌باشد.

مدل VIC توانایی لحاظ نمودن سه نوع مختلف تبخیر که عبارتند از: تبخیر از تاج پوشش گیاهان واقع در هر سلول (E_c)، تعرق از سطح هر کدام از پوشش‌های گیاهی (E_t) و تبخیر از سطح خاک لخت (E_l) را دارا می‌باشد (Liang et al., 1994). مجموع تمامی موارد مذکور، مقدار تبخیر و تعرق کلی خروجی از سطح هر سلول را بدست می‌دهد. مقدار تبخیر و تعرق کلی هر سلول از رابطه زیر قابل استخراج می‌باشد:

$$E = \sum_{n=1}^N C_n (E_{c,n} + E_{t,n}) + C_{N+1} \cdot E_l \quad (2)$$

در رابطه فوق، C_n : درصد مربوط به پوشش گیاهی n ام در هر سلول و C_{N+1} : درصد مربوط به سطح پوشش خاک لخت می‌باشند.

در مدل VIC از روش منحنی نفوذ متغیر برای شبیه‌سازی رواناب استفاده شده است (Zhao et al., 1980). در این روش فرض بر این است که رواناب سطحی تنها زمانی ایجاد می‌گردد که میزان بارش ورودی از حجم قابل نگهداشت خاک تجاوز نماید. نحوه محاسبه رواناب زیرسطحی در این مدل نیز الهام گرفته شده از مدل مفهومی

مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۲- تهیه داده‌های مدل VIC-3L

۳-۲-۱- پوشش گیاهی

نقشه مربوط به پوشش گیاهی در این پژوهش از داده‌های ماهواره AVHRR که توسط محققین دانشگاه مریلند و در ابعاد سلولی ۱ و ۸ کیلومتر ایجاد شده، تهیه گردیده است. در شکل ۳ نقشه پوشش گیاهی حوضه آبریز سفیدرود با ابعاد سلولی ۸ کیلومتر نشان داده شده است. پس از تعیین کلاس‌های پوشش گیاهی، بایستی فایل مربوط به پوشش گیاهی موردنیاز مدل VIC را تهیه نمود. این فایل حاوی پارامترهایی است که عمده آنها فرآیند تبخیر و تعرق (از سطوح گیاهان) را کنترل می‌کنند. از مهمترین پارامترهای مذکور می‌توان به شاخص سطح برگ، ضریب آلبیدو، حداقل مقاومت روزنه‌ای، مقاومت ساختاری گیاه، طول زبری، طول جابجایی و حداقل تابش با طول موج کوتاه که در آن فرآیند تعرق رخ می‌دهد، اشاره نمود. با توجه به مشکلات موجود در راستای اندازه‌گیری مستقیم این پارامترها، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور به دلیل دید وسیع، یکپارچه و به‌روز بودن تصاویر ماهواره‌ای، روشی سریع و مناسب جهت تعیین برخی از پارامترهای پوشش گیاهی مدل VIC توصیه می‌شود (Chason et al., 1991; Wang et al., 2004; Yi et al., 2008; Zhou et al., 2004).

خیلی مرتفع و پرشیب، مناطق مرتفع ولی با شیب کم، مناطق تپه ماهوری، دره‌های عمیق و دشت‌های آبرفتی، قابل مشاهده می‌باشد. سفیدرود بزرگترین رودخانه از نظر مساحت حوضه آبریز و همچنین پرآب‌ترین آنها در مناطق مرکزی و شمال ایران می‌باشد. این رودخانه از دو شاخه اصلی بنام قزل‌اوزن و شاهرود تشکیل می‌شود که در شهر منجیل به هم پیوسته و از آن به بعد سفیدرود نامیده می‌شود. در این پژوهش قسمت سفیدرود- قزل‌اوزن (بالادست ایستگاه هیدرومتری گیوان) مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل ۲ نمایی از موقعیت حوضه آبریز مذکور، شبکه محاسباتی موردنیاز مدل VIC و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی موجود نشان داده شده است.

همانطور که عنوان شد، اساس مدل VIC-3L تقسیم‌بندی حوضه آبریز به تعدادی سلول است بطوریکه با استفاده از اطلاعات، هواشناسی، خاکشناسی و پوشش گیاهی هر سلول، بیلان انرژی و آبی هر سلول به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. طبق نظر توسعه‌دهندگان این مدل مناسب‌ترین ابعاد سلول محاسباتی جهت مدل‌سازی در حوضه‌هایی با تراکم داده‌های بارشی کم و با وسعت حوضه سفیدرود (حدود ۶۰ هزار کیلومترمربع) بین ۰/۲۵ تا ۱ درجه می‌باشد (Maurer, 2011). بر همین اساس و با توجه به مقیاس داده‌های در دسترس و همچنین امکان اجرای مدل در حوضه بزرگ سفیدرود، ابعاد سلولی ۰/۲۵ درجه برای ساخت شبکه محاسباتی و همچنین ارزیابی منابع بارشی مختلف

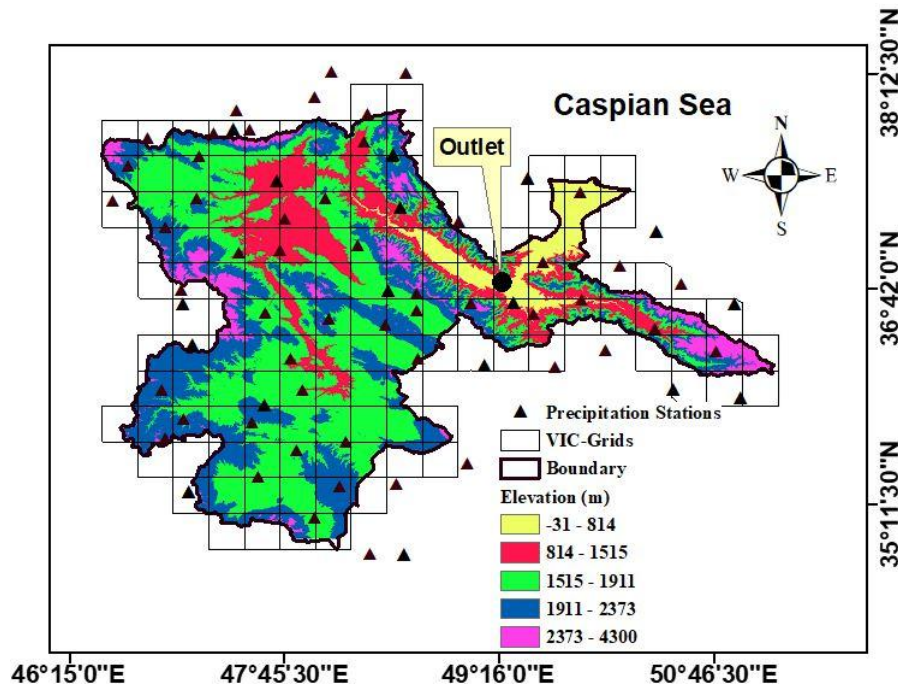


Fig. 2- Geographical location of SefidRood catchment, computational cells of VIC model and the spatial distribution of meteorological stations

شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز سفیدرود، سلول‌های محاسباتی مورد استفاده در مدل و نحوه توزیع مکانی ایستگاه‌های هواشناسی

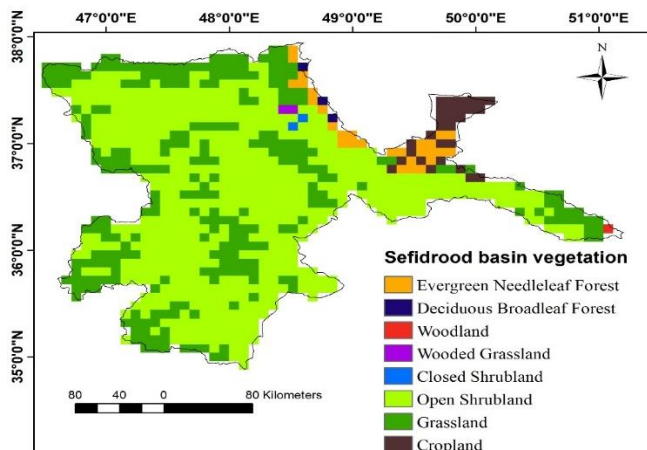


Fig. 3- Vegetation map of SefidRood catchment

شکل ۳- نقشه پوشش گیاهی حوضه آبریز سفیدرود

خصوصیات خاک و یا توابع کتابخانه‌ای استخراج نمود و برخی دیگر را نیز در طول فرآیند واسنجی مدل بدست آورد. از بین پارامترهایی که از طریق توابع کتابخانه‌ای و یا از روی خصوصیات بافت خاک بدست می‌آیند می‌توان به پارامترهایی همچون: تخلخل خاک، پتانسیل خاک اشباع، ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، رطوبت ظرفیت زراعی، چگالی ظاهری خاک، رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی و غیره اشاره نمود (Azizian and Shokoohi, 2017). همچنین مهمترین پارامترهایی که در طول فرآیند واسنجی بدست می‌آیند عبارتند از: پارامتر شکل نفوذ (b_{inf})، کسری از پارامتر D_m که با پارامتر D_s نشان داده می‌شود، حداکثر جریان زیرسطحی (D_m)، کسری از حداکثر رطوبت خاک در لایه سوم (W_s)، عمق لایه دوم و سوم خاک (d_2 و d_3).

۲-۳-۲- نقشه خاک

در حال حاضر برای تهیه نقشه خاک منابع مختلفی همچون نقشه‌های ۰/۲۵ درجه ناسا، نقشه‌های ۰/۰۸۳۳۳ درجه سازمان فائو/ یونسکو و یا نقشه‌های خاک موجود در سطح کشور مانند نقشه مؤسسه تحقیقات خاک و آب وجود دارند که در این پژوهش از نقشه‌های خاک مؤسسه تحقیقات خاک و آب استفاده بعمل آمده است. در شکل ۴ توزیع مکانی بافت‌های مختلف خاک در حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود بافت‌های غالب این حوضه را بافت‌های رسی و لومی رسی تشکیل داده‌اند. پارامترهای مختلفی از خصوصیات خاک جهت مدل‌سازی بیلان رطوبت و رواناب مورد نیاز می‌باشد که می‌توان برخی از آنها را با توجه به بافت غالب از روی

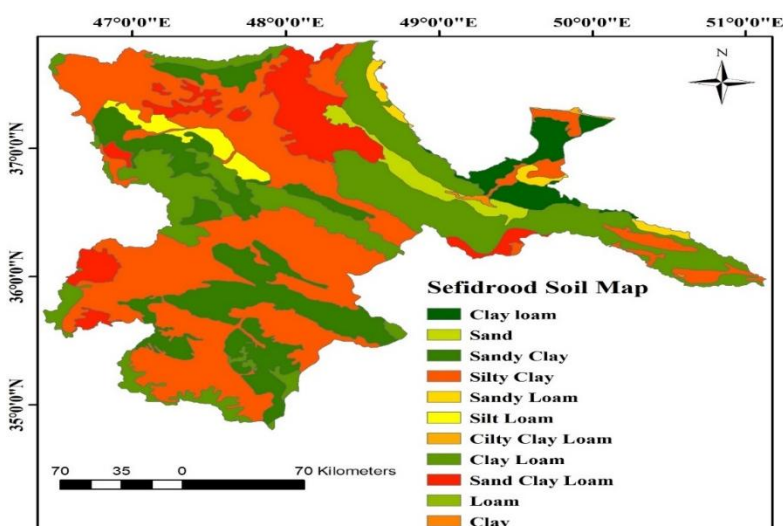


Fig. 4- Soil texture's map of SefidRood catchment

شکل ۴- نقشه بافت خاک حوضه آبریز سفیدرود

۲-۴-۲- پایگاه بارشی ECMWF

از دیگر منابع مهم برآورد بارش می‌توان به داده‌های بازتحلیل شده (Reanalysis) و یا تحلیل مجدد Era-Interim پایگاه اطلاعاتی ECMWF اشاره کرد. پایگاه اطلاعاتی ECMWF یکی از مهم‌ترین پایگاه‌های داده بازتحلیل شده در جهان می‌باشد که مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد (Dee et al., 2011). طبق تحقیقات گسترده‌ای که در این زمینه انجام شده، میزان خطای این منبع اطلاعاتی در مقایسه با داده‌های زمینی در بسیاری از نقاط جهان اندک و قابل چشم‌پوشی است و به همین علت می‌توان از آنها در کنار داده‌های زمینی و حتی در حکم جایگزینی برای داده‌های زمینی در مناطق بدون ایستگاه استفاده نمود (Raziei and Sotodeh, 2017). داده‌های بازتحلیل شده از ترکیب نتایج پیش‌بینی‌های کوتاه مدت مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا با داده‌های مشاهداتی زمینی بدست می‌آید. پیش‌بینی‌های مدل عددی که حدس اولیه نامیده می‌شود بر اساس داده‌های ورودی مدل و رابط ریاضی تعریف شده برای مدل بدست می‌آید (Dee et al., 2011; Balsamo et al., 2015). از آنجایی که پیش‌بینی‌های مدل‌های عددی مذکور همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است، این پیش‌بینی اولیه با داده‌های مشاهده‌ای زمینی که به مرکز پیش‌بینی می‌رسد کنترل می‌شود. به عبارت بهتر با اینکار مدل بهینه شده تا پیش‌بینی‌های آن خطای کمتری داشته باشد. داده‌های پایگاه اطلاعاتی ECMWF بطور کاربردی از سال ۱۹۷۹ با پوشش سراسری از ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی، تفکیک مکانی 0.125×0.125 ، 0.25×0.25 ، 0.4×0.4 ، 0.5×0.5 تا ۳ درجه و در مقیاس زمانی روزانه در دسترس می‌باشد.

۲-۵- واسنجی مدل VIC-3L

با توجه به عدم وجود اطلاعات زمینی از وضعیت رطوبت و تبخیر و تعرق در سطح حوضه، بایستی برای واسنجی مدل VIC از داده‌های دبی مشاهداتی استفاده نمود. در پژوهش حاضر از سری زمانی جریان روزانه ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری گیلوان (واقع در خروجی حوضه سفیدرود) برای این منظور استفاده به عمل آمده است. همچنین لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی رواناب توسط این مدل، پارامترهای خاک از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشند و لذا برای حصول نتایج قابل اعتماد بایستی در برآورد پارامترهای خاک نهایت دقت را به عمل آورد. بررسی تحقیقات صورت گرفته (Azizian, 2004; Gao et al., 2017 and Shokoochi) حاکی از آن است که برای شبیه‌سازی رواناب، مهم‌ترین پارامترهای ورودی عبارتند از: D_m (پارامتر مربوط به

مهم‌ترین داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل VIC-3L عبارتند از: بارش روزانه (میلیمتر)، حداقل و حداکثر دمای روزانه (درجه سانتیگراد)، سرعت باد (متر بر ثانیه) و رطوبت هوا. با توجه به ایستگاه‌های داخل و خارج محدوده حوضه آبریز سفیدرود، ۱۳ ایستگاه سینوپتیک و ۵۰ ایستگاه بارانسنجی انتخاب شدند که از اطلاعات آنها در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ جهت مدل‌سازی رواناب با مدل VIC استفاده گردید. از آنجایی که داده‌های بارشی بدست آمده از پایگاه‌های ماهواره‌ای به صورت شبکه‌بندی شده می‌باشند، بایستی داده‌های زمینی نیز به فرمت مزبور (با استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی) تبدیل شوند تا بهتر بتوان آنها را با داده‌های ماهواره‌ای مقایسه نمود. علی‌رغم وجود روش‌های مختلف درون‌یابی، در این پژوهش از روش معکوس مجذور فاصله (IDW) برای ایجاد لایه شبکه‌بندی شده بارش بر اساس داده‌های زمینی استفاده شده است. عملکرد هر کدام از روش‌های درون‌یابی بسته به نوع پدیده موردنظر و تراکم نقاط موجود می‌تواند متفاوت می‌باشد. بررسی‌های صورت توسط محققین مختلف در زمینه ارزیابی کارایی روش‌های مختلف درون‌یابی برای ساخت نقشه رستری (شبکه‌بندی شده) بارش حاکی از آن است که این روش علی‌رغم دارا بودن ساختار ساده آن، از عملکرد قابل قبولی برخوردار می‌باشد (Driks et al., 1998; Hsieh et al., 2006; Ly et al., 2011). همچنین برای ارزیابی بهتر عملکرد پایگاه‌های بارش ECMWF و PERSIAN، ابعاد سلولی مورد استفاده برای ساخت شبکه بارشی از روی داده‌های زمینی، 0.25 درجه اختیار گردید.

۲-۴-۲- پایگاه‌های بارشی مدل مینا و مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور

۲-۴-۱- پایگاه بارشی PERSIANN

در این پایگاه بارشی ارزشمند از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی و تصاویر بازتابش شده مادون قرمز توسط ماهواره‌های زمین مرجع برای تخمین میزان بارندگی استفاده می‌شود. الگوریتم PERSIAN ابتدا براساس تصاویر مادون قرمز از ماهواره‌های زمین مرجع بود، سپس به نسخه جدید آن که در حال حاضر استفاده می‌شود، داده‌های میکروویو نیز اضافه شد که این داده‌های جدید برای کالیبراسیون و تنظیم پارامترهای الگوریتم بکار می‌روند. مطالعات اعتبارسنجی نشان می‌دهند که تخمین‌های بارش بطور قابل توجهی توسط تنظیم داده‌های بدست آمده از مادون قرمز با اطلاعات میکروویو، بهبود یافته‌اند (Hsu et al., 1997). الگوریتم برآورد بارش PERSIANN بطور کاربردی از سال ۱۹۸۳ با پوشش سراسری از ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی، تفکیک مکانی 0.25×0.25 درجه و مقیاس زمانی

جدول ۱، R_{obs} : مقادیر مشاهداتی، R_{sat} : مقادیر شبیه‌سازی، n : تعداد داده‌ها، \bar{R}_{obs} : میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{R}_{sat} : میانگین مقادیر شبیه‌سازی توسط پایگاه داده موردنظر و n : تعداد داده‌های بارشی در طول بازه زمانی می‌باشند. نزدیکی شاخص‌های شماره ۲ و ۳ در جدول به عدد ۱ حاکی از برازش بیشتر مقادیر شبیه‌سازی شده مدل با مقادیر مشاهداتی خواهد بود. (Demaria et al., 2007; Su et al., 2007).

۳- نتایج

۳-۱- ارزیابی پایگاه‌های بارشی ECMWF و PERSIAN

نتایج حاصل از ارزیابی شاخص‌های آماری مربوط به پایگاه بارشی ECMWF، حاکی از عملکرد بالای آن نسبت به پایگاه بارشی PERSIAN می‌باشد. طبق محاسبات صورت گرفته بر روی پایگاه ECMWF، در سطح حوضه آبریز سفیدرود شاخص CC همواره بالاتر از ۰/۶ می‌باشد و این در حالی است که مقدار مزبور برای پایگاه PERSIAN همواره کمتر از ۰/۵ می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر این است که پایگاه بارشی ECMWF در تشخیص بارش‌های کمتر از ۲ میلی‌متر در روز در سطح حوضه آبریز سفیدرود دارای خطا می‌باشد.

همچنین مقدار شاخص RMSE در این پایگاه همواره کمتر از ۲/۳ میلی‌متر می‌باشد که این خود گویای عملکرد مناسب این منبع اطلاعاتی ارزشمند می‌باشد. بررسی عملکرد منبع بارشی PERSIAN نیز حاکی از آن است که این پایگاه بارشی نیز همانند دیگر پایگاه‌های بارشی در تخمین بارش‌های سبک دارای خطا بوده و تقریباً از توانایی پایینی در برآورد بارش‌های کمتر از ۳ میلی‌متر در روز برخوردار می‌باشد.

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 با توجه به وجود روشهای مختلف واسنجی، در پژوهش حاضر از روش احتمالاتی $GLUE^2$ که از فرآیند عملیاتی کردن راحت‌تری به ویژه در محیط سیستم عامل Linux برخوردار است، استفاده به عمل آمده است. مدل VIC در حال حاضر تنها بر روی سیستم عامل لینوکس قابل اجرا بوده و اگرچه برنامه‌هایی همچون Cygwin امکان لازم برای اجرا آن را در بستر سیستم عامل ویندوز میسر ساخته است، اما مشکلات موجود در راستای عدم کامپایل شدن برخی از اسکرپت‌ها، کاربرد آن را محدود می‌نماید و لذا توصیه می‌شود از بستر لینوکس برای اجرای مدل VIC استفاده به عمل آید. همچنین برای آشنایی بیشتر با روش $GLUE$ توصیه می‌شود به (Freer et al. (1996) و (Beven and Binley (1992) مراجعه شود.

۲-۶- شاخص‌های آماری مورد استفاده برای ارزیابی پایگاه‌های بارشی و خروجی مدل VIC

در این پژوهش برای ارزیابی پایگاه‌های اطلاعاتی بارش از دو شاخص RMSE و CC استفاده شده است و همچنین برای تعیین عملکرد مدل VIC در شبیه‌سازی رواناب علاوه بر شاخص‌های مذکور از شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NS) نیز استفاده گردیده است (جدول ۱).

Table 1- Statistical Indices which are used in this research

جدول ۱- شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش

| No | Measure | Equation |
|----|-------------------------|---|
| 1 | Root Mean Square Error | $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{obs} - R_{sat})^2}$ |
| 2 | Correlation Coefficient | $CC = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{obs} - \bar{R}_{obs})(R_{sat} - \bar{R}_{sat})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{obs} - \bar{R}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (R_{sat} - \bar{R}_{sat})^2}}$ |
| 3 | Nash-Sutcliffe | $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_{sat} - R_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{sat} - \bar{R}_{obs})^2}$ |

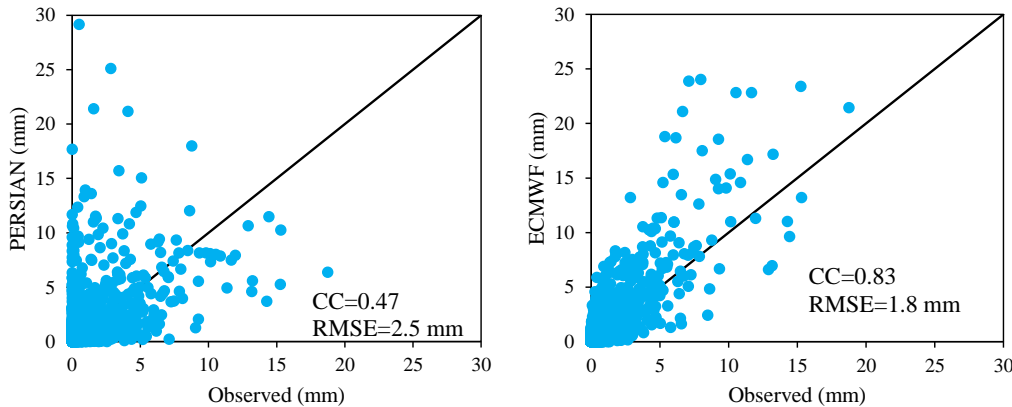


Fig. 5- Scatter plot of satellite-based products and observed rainfall over the SefidRood catchment (daily time scale)

شکل ۵- نمودار پراکنش داده‌های پایگاه‌های بارشی و مشاهداتی در سطح حوضه آبریز سفیدرود (مقیاس روزانه)

پایگاه بارشی ECMWF نسبت به PERSIAN از عملکرد به مراتب بالاتری در تخمین بارش برخوردار می‌باشد.

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

۳-۲-۱- مقیاس زمانی روزانه

برای ارزیابی هرچه بهتر کارایی پایگاه‌های بارشی ECMWF و PERSIAN در شبیه‌سازی رواناب، مدل VIC در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه اجرا گردید که در این بخش به تشریح عملکرد مدل VIC در مقیاس روزانه پرداخته شده است. هیدروگراف جریان روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل با استفاده از پایگاه‌های بارشی مذکور و نیز داده‌های بارش زمینی در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از کاربرد دو پایگاه بارشی مزبور حاکی از آن است که پایگاه بارشی PERSIAN علی‌رغم دقت پایین در برآورد بارش نسبت به پایگاه ECMWF، نتایج به مراتب بهتری را در شبیه‌سازی رواناب ایجاد نموده است. طبق محاسبات صورت گرفته، ضریب کارایی نش-ساتکلیف مربوط به رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل VIC در صورت استفاده از داده‌های بارشی PERSIAN در حدود ۰/۸ می‌باشد و این در حالی است که مقدار شاخص مزبور در صورت استفاده از داده بارشی ECMWF به مقدار ۰/۶۷ محدود می‌گردد.

همچنین برای ارزیابی بهتر عملکرد مدل VIC، پنج نقطه که در آنها دبی اوج رخ داده است بر روی هیدروگراف جریان روزانه مشخص گردید و برای هر کدام از آنها درصد خطای نسبی مربوط به برآورد حجم رواناب و نیز دبی‌های اوج محاسبه گردید که نتایج بدست آمده به تفکیک هر پایگاه بارشی در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از پایگاه بارشی PERSIAN برای

همچنین برای بررسی هرچه بهتر پایگاه‌های بارشی ECMWF و PERSIAN مقادیر شاخص‌های آماری CC و RMSE برای تمامی سلول‌ها محاسبه و نتایج آن به صورت مکانی برای هر منبع تهیه گردید که در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد. بررسی شاخص آماری CC برای تمامی سلول‌های محاسباتی در سطح حوضه سفیدرود حاکی از آن است که داده‌های بدست آمده از پایگاه بارشی ECMWF از همبستگی مناسبی با داده‌های زمینی برخوردار می‌باشند، به طوری که در مقیاس روزانه مقدار این شاخص در کل حوضه بین ۰/۵۵ تا ۰/۸ متغیر می‌باشد. با توجه به شکل ۷ عملکرد منبع ECMWF در مناطق جنوبی و تا حدی مرکزی حوضه آبریز سفیدرود قابل توجه بوده، به طوری که میزان شاخص CC برای این مناطق بین ۰/۷۵ تا ۰/۸ متغیر می‌باشد. همچنین مقدار متوسط شاخص RMSE در سطح حوضه کمتر از ۲/۶ میلیمتر است و این خود گویای انحراف کم داده‌های این منبع نسبت به داده‌های زمینی می‌باشد. با توجه به توضیحات فوق می‌توان چنین استنباط نمود که این منبع اطلاعاتی ارزشمند از کفایت بسیار مناسبی برای تخمین مقدار بارش برخوردار می‌باشد. هرچند لازم به ذکر است که همچون منابع بارشی دیگر، بایستی قبل از استفاده از داده‌های این پایگاه تصحیحات موردنیاز بر روی آن انجام گیرد تا خطای آن تا حد زیادی کاهش داده شود. بررسی عملکرد منبع بارشی PERSIAN نیز حاکی از آن است که مقدار همبستگی بین داده‌های این منبع و داده‌های بارش زمینی در تمامی سلول‌های محاسباتی به کمتر از ۰/۵ محدود می‌گردد. همچنین مقدار شاخص RMSE نیز به علت دارا بودن محدوده تغییرات ۲/۵ تا ۴/۰ میلیمتر، حاکی از عملکرد نسبتاً قابل قبول این منبع بارشی دارد. ارزیابی نتایج همبستگی مکانی نشان می‌دهد که با حرکت از سمت مرکز به شمال حوضه، میزان اختلاف بین بارش بدست آمده از منبع PERSIAN و داده‌های مشاهداتی کمتر می‌گردد. با توجه به توضیحات فوق می‌توان چنین استنباط نمود که

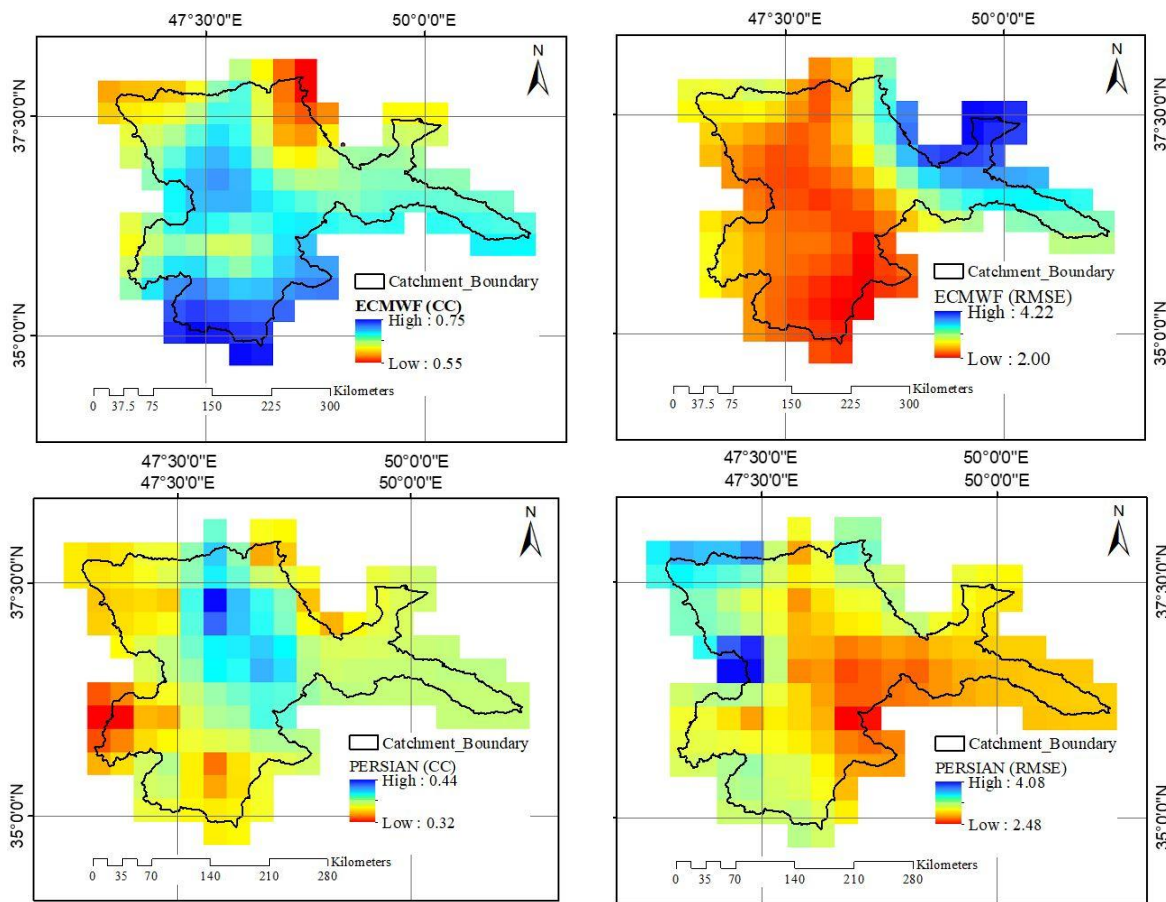


Fig. 6- Spatial distribution of CC and RMSE statistics for ECMWF and PERSIAN products over the study area (daily time scale)

شکل ۶- تغییرات مکانی شاخص‌های آماری CC و RMSE منابع بارشی ECMWF و PERSIAN در سطح حوضه سفیدرود (در مقیاس روزانه)

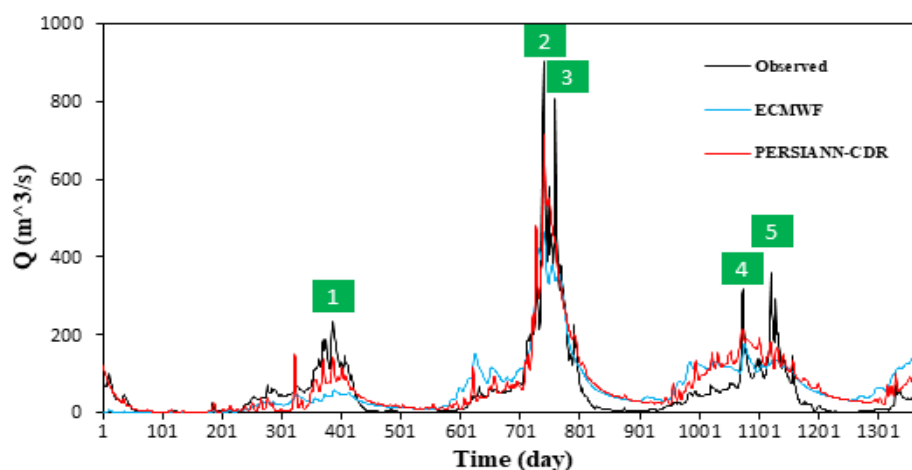


Fig. 7- Simulated and observed flow hydrographs (daily time scale)

شکل ۷- هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل VIC و مشاهداتی (مقیاس روزانه)

پایگاه بارشی ECMWF نسبت به PERSIAN از عملکرد به مراتب بهتری برخوردار است.

شبیه‌سازی دبی اوج با دارا بودن متوسط خطای نسبی (MRE) در حدود ۳۸/۷ دارای بهترین عملکرد می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای تخمین میزان حجم کل رواناب خروجی از حوضه،

مشابه یکدیگر بدست می‌آیند و اختلاف چندان زیادی بین آنها وجود ندارد. بر خلاف ۳ پارامتر مذکور، مقادیر پارامترهای W_s و b_{inf} واسنجی شده در صورت استفاده از پایگاه بارشی PERSIAN بیشتر از مقادیر متناظر موجود در صورت استفاده از پایگاه ECMWF می‌باشند. همانطور که در بخش‌های قبل عنوان شد، پارامتر b_{inf} کنترل کننده میزان نفوذ و متعاقب آن مقدار رواناب سطح می‌باشد. با افزایش مقدار این پارامتر مقدار نفوذ کاهش و رواناب سطحی افزایش می‌یابد و همین مسأله موجب می‌شود ترکیب پایگاه PERSIAN و مدل VIC در تخمین دبی‌های اوج بهتر عمل نماید. همچنین بالا بودن مقدار پارامتر W_s و D_s (این دو پارامتر در تولید دبی پایه موثر می‌باشند که هر چه مقدار آن بیشتر باشد دبی پایه بیشتری توسط مدل شبیه‌سازی خواهد شد) نیز به معنی تولید دبی پایه و جریان زیرسطحی بیشتر می‌باشد که با مراجعه به شکل ۷ می‌توان به خوبی دریافت که ترکیب پایگاه بارشی ECMWF و مدل VIC منجر به تولید دبی پایه بیشتری نسبت به پایگاه PERSIAN می‌گردد.

یافته‌های بدست آمده در این پژوهش با تحقیقات انجام شده در این زمینه از مطابقت خوبی برخوردار می‌باشد. به عنوان مثال، (Su et al. 2017) با ارزیابی ۳ پایگاه بارشی CMORPH، PERSIAN و TRMM نشان دادند که در تخمین مقدار بارش پایگاه بارشی CMOPRH از عملکرد به مراتب بهتر برخوردار می‌باشد و نتایج دو پایگاه دیگر نسبتاً ضعیف می‌باشد.

برای ارزیابی هرچه دقیق‌تر عملکرد مدل VIC نمودار پراکنش اطلاعات رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل و رواناب مشاهداتی نیز ترسیم گردید (شکل ۸). طبق نتایج بدست آمده عملکرد هر دو منبع بارشی در شبیه‌سازی رواناب قابل قبول بوده به طوری که مقدار شاخص کارائی نش-ساتکلیف همواره بالاتر از ۰/۶۵ می‌باشد. همچنین پایگاه بارشی PERSIANN-CDR، با دارا بودن شاخص کارایی نش-ساتکلیف ۰/۸ دارای بهترین عملکرد در شبیه‌سازی رواناب می‌باشد. نکته قابل توجه دیگری که می‌توان از شکل ۸ برداشت نمود این است که تقریباً در هر دو پایگاه بارشی و در دبی‌های بزرگتر از ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه، مدل VIC مقدار رواناب را کم برآورد می‌نماید. بررسی سری زمانی دبی مشاهداتی حاکی از وجود چندین بازه زمانی با دبی اوج قابل توجه است و به نظر می‌رسد در این بازه‌های زمانی سیلاب‌های قابل توجهی رخ داده باشد. از آنجایی که مدل بزرگ مقیاس VIC-3L یک مدل مبتنی بر بیلان می‌باشد، از توانایی لازم برای تخمین و برآورد دبی‌های اوج برخوردار نمی‌باشد. علی‌رغم این محدودیت، نتایج کلی حاصل از خروجی این مدل مطلوب ارزیابی می‌شود. در جدول ۴ نیز مقادیر پارامترهای بهینه دست آمده در مرحله واسنجی (برای هر پایگاه بارشی) ارائه شده است.

بررسی پارامترهای واسنجی بدست آمده در جدول ۴ نشان می‌دهد که در صورت استفاده از دو پایگاه بارشی مختلف به عنوان ورودی مدل VIC، مقادیر پارامترهای d_3 و d_2 ، D_m در طول فرآیند واسنجی تقریباً

Table 2- Characteristics of daily simulated hydrograph by VIC-3L in the case of PERSIAN dataset
جدول ۲- مشخصات هیدروگراف جریان روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل VIC-3L با منبع بارشی PERSIANN

| | | Peak Discharge ($Q^3.S^{-1}$) | | | Runoff Volume (m^3) | |
|------------------|------------------------|---------------------------------|----------|--------|-------------------------|--------------------------|
| | | Simulated | Observed | RE (%) | Simulated | Observed |
| PERSIANN- CDR | Qpeak1 | 142.6 | 232 | 38.5 | 1.0995×10^{13} | 9.04422×10^{12} |
| | Qpeak2 | 663.5 | 904 | 26.6 | | |
| | Qpeak3 | 440.2 | 809 | 45.5 | | |
| | Qpeak4 | 215.1 | 318 | 32.3 | | |
| | Qpeak5 | 178.1 | 361 | 50.6 | | |
| | Average_Relative_Error | | | 38.7 | | |

Table 3- Characteristics of daily simulated hydrograph by VIC-3L in the case of ECMWF dataset
جدول ۳- مشخصات هیدروگراف جریان روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل VIC-3L با منبع بارشی ECMWF

| | | Peak Discharge ($Q^3.S^{-1}$) | | | Runoff Volume (m^3) | |
|-------|------------------------|---------------------------------|----------|--------|-------------------------|--------------------------|
| | | Simulated | Observed | RE (%) | Simulated | Observed |
| ECMWF | Qpeak1 | 54.8 | 232 | 76.3 | 1.1×10^{13} | 9.04422×10^{12} |
| | Qpeak2 | 463.6 | 904 | 48.7 | | |
| | Qpeak3 | 337.3 | 809 | 58.3 | | |
| | Qpeak4 | 220.2 | 318 | 30.8 | | |
| | Qpeak5 | 126.5 | 361 | 51.8 | | |
| | Average_Relative_Error | | | 47.4 | | |

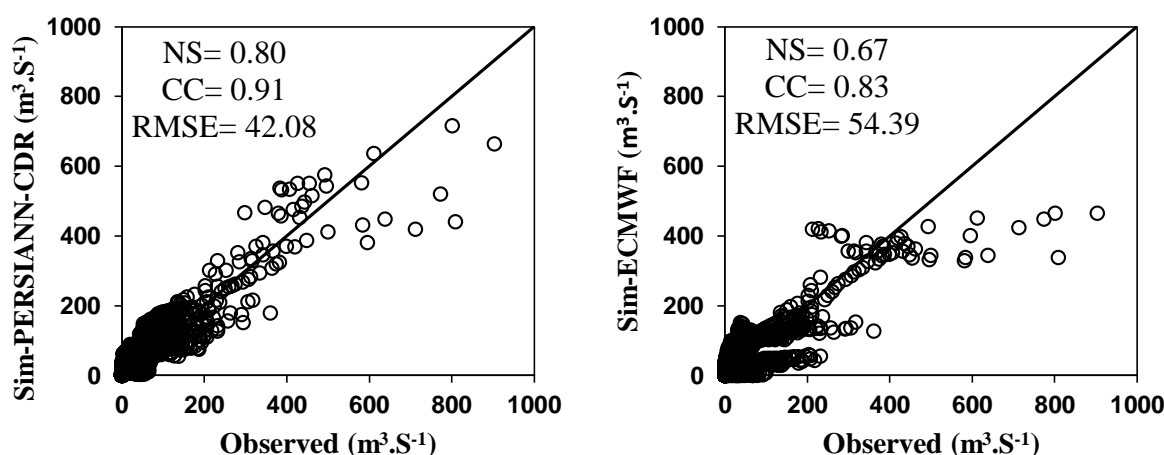


Fig. 8- Scatter plot of observed and simulated runoff using VIC model

شکل ۸- نمودار پراکنش رواناب شبیه‌سازی شده در دو پایگاه بارشی VIC، PERSIANN و مشاهداتی

Table 4- Calibrated parameters of VIC-3L model

جدول ۴- پارامترهای واسنجی شده مدل VIC-3L

| Parameter | b_{inf} | D_s | D_m (mm/hr) | W_s | d_2 (m) | d_3 (m) |
|--------------------|-----------|-------|------------------|-------|-----------|-----------|
| Range of Variation | 0-0.4 | 0-1 | 0-30 | 0-1 | 0.10-2.50 | 0.10-1.50 |
| PERSIANN-CDR | 0.05 | 0.55 | 27.99 | 0.56 | 1.88 | 1.16 |
| ECMWF | 0.01 | 0.97 | 24.57 | 0.90 | 2.06 | 1.12 |
| Observed Data | 0.12 | 0.87 | 29.69 | 0.68 | 0.69 | 1.36 |

VIC در شبیه‌سازی رواناب در صورت استفاده از پایگاه بارشی PERSIANN می‌باشد. هر چند عملکرد مدل VIC در صورت استفاده از پایگاه بارشی ECMWF نیز تا حدود زیادی قابل قبول می‌باشد و به خوبی نشان می‌دهد که در گام زمانی ماهانه هر دو پایگاه مذکور از کارایی مناسبی برای شبیه‌سازی رواناب برخوردار هستند. ذکر این نکته نیز مجدداً ضروری است که پایگاه بارشی ECMWF علاوه بر کارایی قابل قبول در شبیه‌سازی رواناب از پتانسیل خوبی نیز در تخمین بارش برخوردار می‌باشد و این در حالی است که پایگاه PERSIAN در تخمین بارش نسبتاً ضعیف عمل می‌نماید. طبق محاسبات به عمل آمده، مقادیر شاخص‌های آماری نش-ساتکلیف (NS)، CC و RMSE سری زمانی رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولوژیکی در صورت استفاده از این پایگاه PERSIAN به ترتیب در حدود ۰/۸۸، ۰/۹۵ و ۳۰/۸ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد و در این در حالی است که در صورت استفاده از پایگاه مدل مبنای ECMWF مقادیر مذکور به ترتیب در حدود ۰/۷۲، ۰/۸۵ و ۴۶/۱ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود. همچنین برای ارزیابی بهتر عملکرد مدل، ۳ نقطه که در آنها دبی اوج رخ داده است بر روی هیدروگراف جریان ماهانه مشخص گردید و برای هر کدام از آنها درصد خطای نسبی مربوط به برآورد دبی‌های اوج و در نهایت خطای نسبی در محاسبه حجم رواناب نیز محاسبه گردید که نتایج بدست آمده به تفکیک هر پایگاه بارشی در جداول ۵ و ۶ ارائه

اما در مرحله شبیه‌سازی رواناب، ترکیب مدل هیدرولوژیکی و داده‌های بارش TRMM نتایج قابل قبولی را حاصل نموده است. همچنین Qi et al. (2016) با ارزیابی پایگاه‌های بارشی مختلف توسط دو مدل هیدرولوژیکی TOPMODEL و WEB-DHM نشان دادند که به علت وجود اندرکنش‌های بین داده‌های بارش ورودی و پارامترهای مدل هیدرولوژیکی، یک پایگاه خوب در تخمین بارش لزوماً تضمین کننده شبیه‌سازی مناسب جریان توسط مدل هیدرولوژیکی نمی‌باشد. این محققین ثابت نمودند که شبیه‌سازی مناسب جریان بستگی به ترکیب مناسب بین پایگاه بارشی و مدل هیدرولوژیکی دارد و اگرچه ممکن است پایگاه بارش ماهواره‌ای موردنظر همانند ایستگاه‌های زمینی از دقت مناسبی در برآورد بارش برخوردار نباشد، اما در صورت ترکیب صحیح با یک مدل هیدرولوژیکی می‌تواند نتایج به مراتب بهتری را بدست دهد.

۳-۲-۲- مقیاس زمانی ماهانه

در این بخش نیز به بررسی عملکرد پایگاه‌های بارشی ECMWF و PERSIAN در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان ماهانه توسط مدل VIC پرداخته شده است که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده در گام زمانی ماهانه نیز حاکی از عملکرد بهتر مدل

را با تخمین مناسب این پارامتر تا حدود زیادی تضمین نمود. در گام زمانی ماهانه نیز نتایج به خوبی نشان می‌دهد که ترکیب مناسب یک مدل هیدرولوژیکی و پایگاه بارش ماهواره‌ای می‌تواند تا حدود زیادی تضمین کننده شبیه‌سازی مناسب جریان خروجی از حوضه باشد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی صحیح فرآیندهای هیدرولوژیکی توسط مدل‌های بارش- رواناب مانند رواناب سطحی، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و غیره نیازمند داده‌های ورودی مناسب می‌باشد. یکی از مهم‌ترین داده‌های ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی، بارش می‌باشد. با توجه به گسترش روزافزون تکنولوژی‌های ماهواره‌ای و نیز مدل‌های رایانه‌ای، پایگاه‌های بارشی با دقت زمانی و مکانی متعددی توسعه داده شده است.

شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از منبع بارشی PERSIANN-CDR برای شبیه‌سازی دبی اوج با دارا بودن متوسط خطای نسبی (MRE) در حدود ۱۵/۲ دارای عملکرد بهتری نسبت به استفاده از منبع ECMWF با MRE در حدود ۳۸/۴ می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که برای تخمین میزان حجم رواناب نیز عملکرد منبع PERSIANN-CDR نسبت به ECMWF به مراتب بهتر می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۲ نیز مشخص می‌باشد، عملکرد مدل VIC در صورت استفاده از داده‌های بارشی PERSIAN مقادیر دبی اوج جریان را با خطای به مراتبی کمتری تخمین می‌زند که علت اصلی آن را می‌توان به برآورد کم پارامتر binf در مرحله واسنجی مرتبط دانست. طبق تحقیقات (Azizian and Shokoohi (2017 خروجی مدل VIC نسبت به این پارامتر از حساسیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد و لذا می‌توان عملکرد مدل در تخمین دبی‌های اوج

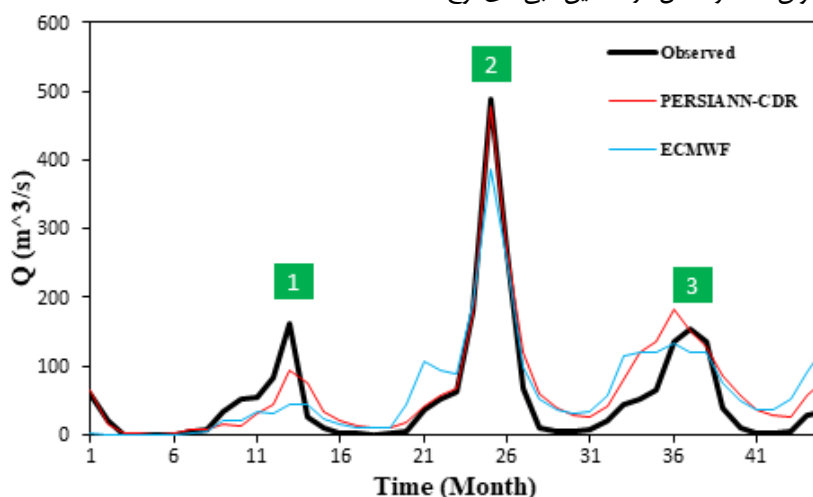


Fig. 9- Simulated and observed flow hydrographs (monthly time scale)

شکل ۹- هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (ماهانه)

Table 5- Characteristics of monthly simulated hydrograph by VIC-3L in the case of PERSIAN dataset

جدول ۵- مشخصات هیدروگراف جریان ماهانه شبیه‌سازی توسط مدل VIC-3L با منبع بارشی PERSIANN

| | Peak Discharge ($Q^3.S^{-1}$) | | | Runoff Volume (m^3) | |
|--|---------------------------------|----------|--------|-------------------------|------------------------|
| | Simulated | Observed | RE (%) | Simulated | Observed |
| | PERSIANN | Qpeak1 | 94.9 | 162.7 | 41.6 |
| | Qpeak2 | 477.2 | 488.3 | 2.2 | 3.614×10^{11} |
| | Qpeak3 | 150.6 | 153.8 | 2.0 | 2.880×10^{11} |
| | Average_Relative_Error | | | 15.2 | 25.5 |

Table 6- Characteristics of monthly simulated hydrograph by VIC-3L in the case of ECMWF dataset

جدول ۶- شبیه‌سازی هیدروگراف جریان ماهانه مدل VIC-3L - منبع بارشی ECMWF

| | Peak Discharge ($Q^3.S^{-1}$) | | | Runoff Volume (m^3) | |
|--|---------------------------------|----------|--------|-------------------------|------------------------|
| | Simulated | Observed | RE (%) | Simulated | Observed |
| | ECMWF | Qpeak1 | 44.5 | 162.7 | 72.6 |
| | Qpeak2 | 386.9 | 488.3 | 20.7 | 3.478×10^{11} |
| | Qpeak3 | 119.9 | 153.8 | 22.0 | 2.880×10^{11} |
| | Average_Relative_Error | | | 38.4 | 20.7 |

روزانه و ماهانه مشخص گردید و برای هر کدام از آنها درصد خطای نسبی مربوط به برآورد دبی اوج و نیز حجم کل هیدروگراف محاسبه گردید که نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد مناسب پایگاه بارشی PERSIANN-CDR دارد. طبق محاسبات صورت گرفته متوسط متوسط خطای نسبی در برآورد دبی‌های اوج در دو گام زمانی روزانه و ماهانه در صورت استفاده از این پایگاه بارشی به ترتیب معادل ۳۸/۴ و ۱۵/۲ درصد می‌باشد. هرچند لازم به ذکر است که در برآورد حجم رواناب، پایگاه ECMWF نسبت به پایگاه PERSIAN دارای عملکرد نسبتاً بهتری می‌باشد. با توجه به توضیحات فوق، می‌توان چنین استنباط نمود که داده‌های PERSIAN برای استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی از عملکرد مناسبی برخوردار است. هرچند برای اینکه به قطعیت بتوان چنین مدعی را بیان نمود بایستی خروجی‌های دیگر مدل VIC مانند: رطوبت سطحی خاک، مقادیر تبخیر و تعرق نیز با داده‌های زمینی و یا داده‌های ماهواره‌ای مناسب (مانند داده‌های تبخیر و تعرق بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و تصاویر ماهواره‌ای رطوبت خاک) کنترل شوند. زیرا در طول فرآیند واسنجی پارامترهای مدل به گونه‌ای تغییر پیدا می‌کند تا سری زمانی شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی کمترین خطا را داشته باشد و همین مساله موجب می‌شود کارایی پایگاه ECMWF (علی‌رغم برتری در برآورد بارش نسبت به پایگاه PERSIAN) کاهش پیدا کند. به عبارت دیگر خطای ناشی از برآورد صحیح مقدار و توزیع مکانی بارش در طول فرآیند واسنجی و تغییراتی که در پارامترهای مدل ایجاد می‌شود، تعدیل می‌گردد. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان چنین عنوان نمود که به علت وجود اندرکنش‌های بین داده‌های بارش ورودی و پارامترهای مدل هیدرولوژیکی، یک پایگاه خوب در تخمین بارش لزوماً تضمین کننده شبیه‌سازی خوب جریان توسط مدل هیدرولوژیکی نمی‌باشد و شبیه‌سازی مناسب جریان بستگی به ترکیب مناسب بین پایگاه بارشی و مدل هیدرولوژیکی دارد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Variable Infiltration Capacity-VIC
- 2- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

۵- مراجع

Abdullahi A, Moazami-Goudarzi S, and Zakeri-Nayeri (2015) Evaluation of three algorithms for the daily hydrological modeling of the Sarough Chai Basin using the satellite precipitation products and applying the IHACRES model. Iranian Journal of Water Resources Engineering 8(27):59-72 (In Persian)

عمده مطالعاتی که تاکنون انجام شده عمدتاً به ارزیابی کارایی پایگاه‌های مزبور در زمینه برآورد مقدار بارش معطوف بوده است و کمتر به کاربرد آنها در مدل‌سازی هیدرولوژیکی پرداخته شده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی دو پایگاه بارش ECMWF (مدل مینا) و PERSIAN (مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور) برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل VIC-3L در سطح حوضه آبریز سفیدرود و در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه به انجام رسیده است. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد قابل قبول پایگاه بارشی ECMWF نسبت به PERSIAN در برآورد مقدار بارش می‌باشد. بررسی شاخص آماری CC (ضریب همبستگی بین پایگاه بارشی و داده‌های زمینی) در مقیاس زمانی روزانه نشان داد که پایگاه ECMWF در عمده سلول‌های محاسباتی همواره مقداری بالاتر از ۰/۶ می‌باشد و این در حالی است که مقدار شاخص مذکور در صورت استفاده از پایگاه PERSIAN همواره کمتر از ۰/۵ است. هرچند لازم به ذکر است که بر خلاف پایگاه بارشی PERSIAN، پایگاه ECMWF تمایل زیادی به بیش برآوردی داشته و علی‌رغم همبستگی بالا با داده‌های بارش زمینی نیازمند تصحیح آریبی می‌باشد تا خطای بیش برآوردی آن کاهش یابد. بر خلاف مقیاس روزانه، در مقیاس ماهانه عملکرد دو پایگاه بارشی مذکور تقریباً نزدیک به هم و مقدار شاخص آماری CC در دو پایگاه ECMWF و PERSIAN به ترتیب معادل ۰/۹۴ و ۰/۹۲ می‌باشد. مقدار شاخص آماری RMSE پایگاه ECMWF در دو گام زمانی روزانه و ماهانه نیز به ترتیب معادل ۳/۲ و ۲۷/۵ میلیمتر می‌باشد که نسبت به پایگاه PERSIAN دارای عملکرد بهتری است. مقدار این شاخص نیز خود گویای عملکرد مناسب این پایگاه اطلاعاتی (به ویژه در مقیاس زمانی روزانه) مدل مینا نسبت به پایگاه مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دوری PERSIAN می‌باشد که عمدتاً با تخمین ضخامت ابر اقدام به برآورد بارش می‌نمایند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب توسط مدل هیدرولوژیکی VIC نیز نشان داد که علی‌رغم برتری پایگاه ECMWF در برآورد بارش به ویژه در مقیاس زمانی روزانه، پایگاه بارشی PERSIAN بر اساس شاخص آماری نش- ساتکلیف نتایج به مراتب بهتری را حاصل نموده است. به عنوان مثال، مقدار شاخص نش- ساتکلیف در صورت استفاده از داده‌های PERSIAN برای دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه به ترتیب معادل ۰/۸۰ و ۰/۸۸ بدست آمده در حالی که مقدار شاخص مذکور در صورت کاربرد پایگاه ECMWF به برای دو مقیاس زمانی مذکور به ترتیب معادل ۰/۶۵ و ۰/۷۲ می‌باشد. همچنین برای ارزیابی عملکرد مدل VIC در تخمین دبی‌های اوج روزانه و ماهانه، تعدادی محدود که در آنها دبی اوج رخ داده است بر روی هیدروگراف جریان

- Dee D, Uppala S, Simmons A, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda M, Balsamo G, Bauer P (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137:553-597
- Demaria EM, Nijssen B, Wagener Th (2007) Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the variable infiltration capacity model. *Journal of Geophysical Research* 112:1-15
- Dembele M, Zwart S J (2016) Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. *International Journal of Remote Sensing* 37(17):3995-4014
- Duan Z, Liu J, Tuo Y, Chiogna C, Disse M (2016) Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. *Science of the Total Environment* 573:1536-1553
- Eini MR, Javadi S and Delavar M (2018) Evaluating the performance of CRU and NCEP CFSR global reanalysis climate datasets, in hydrological simulation by SWAT model, Case Study: Maharlu basin. *Iran-Water Resources Research* 14(1):32-44 (In Persian)
- Parisuj P, Goharnejad H and Moazami S (2018) Rainfall-runoff hydrologic simulation using adjusted satellite rainfall algorithms, a case study: Voshmgir Dam Basin, Golestan. *Iran-Water Resources Research* 14(3):140-159 (In Persian)
- Franchini M, Pacciani M (1991) Comparative analysis of several conceptual rainfall runoff models. *Journal of Hydrology* 122(1-4):161-219
- Freer J, Beven KJ, Ambrose B (1996) Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach. *Water Resources Research* 32(7):2161-2173
- Ghajarnia N, Liaghat A, Arasteh P D (2015) Comparison and evaluation of high resolution precipitation estimation products in Urmia Basin Iran. *Atmospheric Research* 158:50-65
- Grasselt R, Schitttemeyer D, Warrach-Sagi K, Ament F, Simmer C (2008) Validation of TERRA-ML with discharge measurement. *Meteorologische Zeitschrift* 17(6):763-773
- Guo J, Liang X, Leung LR (2004) Impacts of different precipitation data sources on water budgets. *Journal of Hydrology* 298:311-334
- Hadeland I, Lettenmaier DP, Skaugen T (2006) Reconciling simulated moisture fluxes resulting from alternate hydrologic model time steps and
- Andreadis K, Storck P, Lettenmaier DP (2009) Modeling snow accumulation and ablation processes in forested environments. *Water Resources Research* 45(5):W05429
- Ashouri H, Hsu K L, Sorooshian S, Braithwaite D K, Knapp K R, Cecil L D, Prat O P (2015) PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from Multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(1):69-83
- Ashouri H, Nguyen P, Thorstensen A, Hsu K, Sorooshian S, Braithwaite D (2016) Assessing the efficacy of high-resolution satellite-based PERSIANN-CDR precipitation product in simulating streamflow. *Journal of Hydrometeorology* 17(7):2061-2076
- Azizian A and Shokoohi AR (2017) Investigation and sensitivity analysis of a macro scale hydrological model (VIC-3L) for simulation of stream flow at different time scales. *Iranian Journal of Civil and Environmental Engineering* 42(2):39-52 (In Persian)
- Balsamo G, Albergel C, Beljaars A, Boussetta S, Brun E, Cloke H, Dee D, Dutra E, Muñoz-Sabater J, Pappenberger F, de Rosnay P, Stockdale T, Vitart F (2015) ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrology and Earth System Sciences* 19:389-407
- Beven K J, Binley A (1992) The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes* 6(3):279-298
- Bohnenstengel S, Schlienzen KH, Beyrich F (2011) Representatively of in situ precipitation measurements - a case study for the LITFASS area in North-Eastern Germany. *Journal of Hydrology* 400 (3-4):387-395
- Bowling LC, Pomeroy JW, and Lettenmaier DP (2004) Parameterization of blowing-snow sublimation in a macroscale hydrology model. *Journal of Hydrometeorology* 5:745-762
- Chason JW, Baldocchi DD, Huston MA (1991) A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology* 57:107-128
- Cherkauer KA, Lettenmaier DP (1999) Hydrologic effects of frozen soils in the upper Mississippi river basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 104(D16):19599-19610
- De Leeuw J, Methven J, Blackburn M (2015) Evaluation of ERA-Interim reanalysis precipitation products using England and Wales observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141(688):798-806

- Qi W, Zhang C, Fu G, Sweetapple C, and Zhou H (2016) Evaluation of global fine-resolution precipitation products and their uncertainty quantification in ensemble discharge simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 20:903-920
- Rawls WJ, Gimenez D, Grossman R (1998) Use of soil texture, bulk density, and slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 41(4):983-988
- Raziei T, Sotodeh F (2017) Investigation of the accuracy of the European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) in forecasting observed precipitation in different climates of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics* 43(1):133-147
- Stedinger JR, Vogel RM, Lee SU, Batchelder R (2008) Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method. *Water Resources Research* 44:1-17
- Su F, Hong Y, Lettenmaier DP (2007) Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology* 9:622-640
- Su FG, Adam JC, Bowling LC, Lettenmaier DP (2005) Stream flow simulations of the terrestrial Arctic domain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110:D08112
- Wang Y, Woodcock CE, Buennann W, Stenberg P, Voipio P, Smolander H, Hanle T, Tian Y, Hu Jiannan, Knyazikhin Y, Myneni RB (2004) Evaluation of the MODIS LAI Algorithm at a Coniferous FOREST Site in Finland. *Remote Sensing of Environmental* 91:114-127
- Xie Zh, Yuan F (2006) A parameter estimation scheme of the land surface model VIC using the MOPEX databases. *IAHS Publ* 307:169-179
- Xie ZH, Yuan F, Duan Q, Liang M, Chen F (2007) Regional parameter estimation of the VIC land surface model: methodology and application to river basins. *Journal of Hydrometeorology* 8(3):447-468
- Zhao RJ, Zhuang YL, Fang LR, Liu XR, Zhang QS (1980) The Xinanjiang model, hydrological forecasting. *Proceedings Oxford Symposium IASH* 129:351-356
- Zhou S, Liang X, Chen J, Gong Peng (2004) An assessment of the VIC-3L I hydrological Model for the Yangtze River Basin based on remote sensing: a case study of the Baohe River Basin. *Can. J. Remote Sensing* 30(5):840-85
- energy closure assumption. *Journal of Hydrometeorology* 7:355-370
- Haji Hosseini HR, Haji Hosseini MR, Najafi AR, Morid S, and Delavar M (2015) Assessment of changes in hydro-meteorological variables upstream of Helmand Basin during the last century using CRU data and SWAT model. *Iran-Water Resources Research* 10(3):38-52 (In Persian)
- Hsu KL, Gao X, Sorooshian S, Gupta HV (1997) Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology* 36:1176-1190
- Katiraie-Boroujerdy P S, Nasrollahi N, Hsu K, Sorooshian S (2013) Evaluation of satellite-based precipitation estimation over Iran. *Journal of Arid Environments* 97:205-219
- Krogh S A, Pomeroy J W, McPhee J (2015) Physically based mountain hydrological modeling using reanalysis data in Patagonia. *Journal of Hydrometeorology* 16(1):172-193
- Liang X, Guo J, Leung LR (2004) Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations. *Journal of Hydrology* 298:287-310
- Liang X, Wood EF, Lettenmaier DP (1996) Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification. *Global Planetary Change* 13(1-4):195-206
- Lohmann D, Raschke E, Nijssen B, Lettenmaier DP (1998a) Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. *Hydrological Science Journal* 43(1):131-141
- Lohmann DR, Raschke E (1996) A large scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes. *Tellus A* 48:708-721
- Manache G, Melching CS (2008) Identification of reliable regression- and correlation-based sensitivity measures for importance ranking of water-quality model parameters. *Environmental Modelling & Software* 23:549-562
- Mao D, Cherkauer KA (2009) Impacts of land-use change on hydrologic responses in the great lakes region. *Journal of Hydrology* 374:71-82
- Nijssen B, Lettenmaier DP, Liang X, Wetzel W, Wood EF (1997) Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resources Research* 33(4):711-724
- Nijssen B, O'Donnell GM, Lettenmaier DP, Lohmann D, Wood EF (2001) Predicting the discharge of global river. *Journal of Climate* 14:3307-3323