

Rainfall-Runoff Hydrologic Simulation Using Adjusted Satellite Rainfall Algorithms, a Case Study: Voshmgir Dam Basin, Golestan Province

P. Parisooj¹, H. Goharnejad^{2*} and S. Moazami³

Abstract

This study assessed the satellite rainfall data as input for developing a reliable rainfall-runoff model to provide information for early warning flood in the Voshmgir Dam basin in Iran. Two satellite based rainfall estimates (TRMM and PERSIANN) were assessed to evaluate which rainfall product better represents the actual rainfall pattern and intensity of the basin. After evaluation based on statistical parameters such as the Root Mean Square Error (RMSE), Mean Average Error (MAE), Mean Bias Error (MBE) and Correlation coefficient (R2), TRMM were selected for rainfall-runoff simulations. Among six years of available discharge data from 2002 to 2007, period of 2002 to 2004 was used for calibration whereas data from 2005 to 2007 were used for validation. In addition to continuous daily rainfall-runoff model development using HEC-HMS, an event based flood model was also developed. Also simulations based on daily TRMM versus 3-hourly TRMM were compared to evaluate the effect of input time-step on the results. Results showed that the deficit constant loss method successfully predicted gauged catchment runoff and peak flows for calibration (NSE= 0.413, R²=0.482, RVE= -0.246 %) and validation (NSE= 0.621, R²=0.670, RVE=-0.329 %) periods. Also the developed model estimated the rainfall-runoff process for the monthly or longer time scales better than the daily scale. In addition, the event based HEC-HMS model developed using TRMM data with shorter time steps (3-hourly) showed good capability to simulate daily peak discharges. The study demonstrated the suitability of HEC-HMS for continuous runoff simulation in a complex watershed. Therefore, this work will have a significant contribution for the future development of water resources programs in this catchment in particular as well as in other data-scarce catchments.

Keywords: HEC-HMS, GIS, TRMM, PERSIANN, Flood Forecasting, Voshmgir Dam.

Received: October 4, 2017

Accepted: March 23, 2018

شبیه‌سازی هیدرولوژیکی بارش-رواناب با استفاده از الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای اصلاح‌شده، مطالعه موردی: حوضه سد وشمگیر، گلستان

پیمان پریسوژ^۱، حمید گهرنژاد^{۲*} و صابر معظمی^۳

چکیده

این مطالعه به ارزیابی پتانسیل اطلاعات بارش ماهواره‌ای برای توسعه مدل معتبر بارش-رواناب جهت تولید اطلاعات هشدار سیلاب در حوضه سد وشمگیر می‌پردازد. دو محصول بارش ماهواره‌ای (TRMM و PERSIANN) مورد ارزیابی قرار گرفتند تا مشخص شود که کدام محصول الگوی بارش واقعی و شدت آن را در این حوضه بهتر نشان می‌دهد. بعد از انجام ارزیابی بر پایه پارامترهای آماری همچون RMSE، MAE، MBE و R² تخمین‌های TRMM برای شبیه‌سازی بارش-رواناب انتخاب شد. در میان شش سال حاوی اطلاعات دبی (۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷)، بازه ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ برای واسنجی و بازه ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ برای صحت‌سنجی استفاده شد. علاوه بر توسعه مدل روزانه بارش-رواناب در HEC-HMS، مدلی بر پایه رخداد نیز توسعه یافت. همچنین شبیه‌سازی بر اساس اطلاعات روزانه TRMM در مقابل اطلاعات ۳ ساعته آن نیز مورد مقایسه قرار گرفت تا بتوان تأثیر گام‌های زمانی در نتایج را نیز مورد ارزیابی قرارداد. نتایج نشان داد که مدل تلفات Deficit Constant در بازه واسنجی (NSE= 0.413, R²=0.482, RVE= -0.246 %) و بازه صحت‌سنجی (NSE= 0.621, R²=0.670, RVE=-0.329 %) مقدار رواناب و همچنین مقدار دبی حداکثر روزانه را بهتر تخمین می‌زند. همچنین مدل کاربردی مقیاس‌های ماهانه و بزرگ‌تر را بهتر از مقیاس روزانه تخمین خواهد زد. به‌علاوه مدل کاربردی HEC-HMS بر پایه رخداد در گام‌های زمانی سه‌ساعته دبی حداکثر را بهتر تخمین می‌زند. این مطالعه بیانگر مناسب بودن مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی رواناب پیوسته در حوضه‌های پیچیده می‌باشد.

کلمات کلیدی: HEC-HMS، GIS، TRMM، PERSIANN، پیش‌بینی سیلاب، سد وشمگیر.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۷/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱/۳

1- Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Environmental Sciences Research Center, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran. Email: H.goharnejad@iiu.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Environmental Sciences Research Center, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran.

*- Corresponding Author

۱- گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، مرکز تحقیقات علوم زیست‌محیطی، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، مرکز تحقیقات علوم زیست‌محیطی، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

هدف از این مطالعه کاربرد مدل بارش-رواناب برای پیش‌بینی خطر سیلاب برای حوضه آبریز سد وشمگیر واقع در استان گلستان به کمک اطلاعات بارش استخراج شده از ماهواره‌های TRMM¹ و الگوریتم PERSIANN² می‌باشد. به‌طور کلی مدل‌های حوضه‌های آبریز برای رسیدن به دو هدف به کار می‌روند. هدف اول به‌دست آوردن درک بهتر نسبت به رفتار حوضه و شناخت عواملی است که تغییر آن‌ها رفتارهای حوضه را تغییر می‌دهد. هدف دوم تولید اطلاعات هیدرولوژیکی ترکیبی برای سهولت طراحی پروژه‌های مدیریت منابع آب، حفاظت سیلاب و انتقال آلودگی می‌باشد. راه ساده و معمول برای پیش‌بینی سیلاب ثبت اطلاعات بارش توسط ایستگاه‌های باران‌سنجی و سپس به‌کارگیری این بارش برای پیش‌بینی دبی در نقطه مورد نظر به کمک مدل بارش-رواناب می‌باشد (Burlando et al., 1993).

روش PERSIANN دستگاهی است که الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی را برای تخمین میزان بارندگی در هر پیکسل ۰/۲۵ در ۰/۲۵ درجه و با استفاده از تصاویر بازتابش شده مادون قرمز توسط ماهواره‌های زمین مرجع، بکار می‌گیرد. این الگوریتم ابتدا بر اساس تصاویر مادون قرمز از ماهواره‌های زمین مرجع بود، سپس به نسخه جدید آن که در حال حاضر استفاده می‌شود داده‌های مایکروویو نیز اضافه شد که این داده‌های جدید برای واسنجی و تنظیم پارامترهای الگوریتم به‌کار می‌روند. الگوریتم در سه مرحله تصاویر مادون قرمز با طول موج بلند را به تخمین‌های بارندگی تبدیل می‌کند:

مرحله ۱: محاسبه کمیت‌های میانگین و واریانس مربوط به دماهای بازتابش شده از سطح بالایی ابر در نزدیکی پیکسل هدف؛

مرحله ۲: دسته‌بندی ویژگی‌های استخراج‌شده؛

مرحله ۳: تبدیل ویژگی‌های دسته‌بندی شده به نرخ‌های بارندگی

همچنین، هر زمان که داده‌های مایکروویو جدید در دسترس باشند، پارامترهای شبکه عصبی توسط تکنیکی هوشمند به‌روز می‌شوند. نسخه کاربردی الگوریتم PERSIANN در دو روش موازی زیر اجرا می‌شود:

- روش شبیه‌سازی؛ که تخمین‌های بارش را در وضوح مکانی ۰/۲۵ در ۰/۲۵ درجه و زمانی ۳۰ دقیقه بر اساس داده‌های مادون قرمز ماهواره‌های زمین مرجع به دست می‌آورد.
- روش به‌روز نمودن به‌طور پیوسته؛ که به‌طور پیوسته پارامترهای الگوریتم را بر اساس پیکسل‌هایی که دارای تخمین‌های بارش لحظه‌ای مایکروویو غیرفعال هستند، به‌روز می‌کند. این روش برای بهبود کیفیت تخمین‌های بارش به‌دست آمده از مادون قرمز، طراحی شده است. الگوریتم برآورد بارش PERSIANN به‌طور کاربردی از

از مهم‌ترین متغیرهای هیدرولوژیکی که کاربرد فراوانی در برنامه‌ریزی‌های منابع آب دارد رواناب می‌باشد. اطلاعات دقیق از مقدار و شدت رواناب از سطح زمین به داخل رودخانه‌ها برای مدیریت منابع آب ضروری می‌باشد. این اطلاعات برای بیشتر مسائل مدیریت و توسعه حوضه‌ها مورد نیاز می‌باشد. تخمین رواناب و جریان رودخانه مطالعات هیدرولوژیکی مهمی برای توسعه منابع آب، برنامه‌ریزی و مدیریت آن می‌باشند. مدل‌های بارش-رواناب که پاسخ حوضه و هیدروگراف جریان را شبیه‌سازی می‌کنند به‌طور وسیعی برای پیش‌بینی سیلاب (Nayak et al., 2013) و مدیریت منابع آب (Ghafouri., 2013) و مدیریت منابع آب (Laurent et al., 1998; Agbonkhese et al., 2014; Babatolu et al., 2014; Dube et al., 2014) به کار می‌روند. پیش‌بینی سیلاب و دستگاه‌های هشدار ابزار بسیار مهمی برای مدیریت سیلاب و خطرات ناشی از آن می‌باشند (Burlando et al., 1993). مدل‌های هیدرولوژیکی فیزیکی برای پیش‌بینی دبی رودخانه نیاز به اطلاعات هیدرولوژیکی و هواشناسی قابل توجهی دارند (Goharnejad et al., 2017). روند معمول برای پیش‌بینی سیلاب تخمین رواناب به کمک اطلاعات بارش و دیگر پارامترهای هواشناسی به کمک مدل‌های بارش-رواناب می‌باشد (Fotopoulos et al., 2010; Gumindoga et al., 2014; Habib et al., 2014; Kibena et al., 2014; Pappenberger et al., 2015). بارش اصلی‌ترین فاکتور هر مدل هیدرولوژیکی می‌باشد که کیفیت و کمیت آن نقشی اساسی در اجرای مدل بازی می‌کند (Bhattarai, 2013).

در بسیاری از حالات شبکه ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش مخصوصاً در کشورهای درحال توسعه پراکنده می‌باشد که این امر تخمین رواناب را با مشکل مواجه می‌سازد. سنجش از دور (RS) می‌تواند کمبود اطلاعات در دسترس و مورد نیاز مدل‌های بارش-رواناب را جبران نماید (Stisen et al., 2008). پایش‌های انجام گرفته از بارش بر پایه تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش جهانی رو به افزایش به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. تخمین‌های ماهواره‌ای در مناطق دارای اطلاعات محدود مانند کشور ایران اهمیت زیادی در اجرای اهداف کاربردی دارند. همچنین این تخمین‌ها به دلیل بهنگام بودن، قیمت پایین و پوشش خوب می‌توانند به‌عنوان یک ورودی خوب برای مدل‌های هیدرولوژیکی باشند (Teo & Grimes, 2007). با این وجود، انتخاب مناسب اطلاعات بارش برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی همچنان به‌عنوان چالشی در میان محققان مطرح است.

سال ۲۰۰۰ با پوشش سرتاسری از ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی و با دقت زمانی ۳ ساعته و مکانی ۰/۲۵ در ۰/۲۵ درجه در دسترس می‌باشد. با این حال به خاطر متغیر بودن فاکتورهای زیادی مانند وضعیت اتمسفر، نوع ابر، ارتفاع و ضخامت ابر، این الگوریتم با عدم قطعیت‌های زیادی همراه است. در واقع PERSIANN روش شبکه عصبی را برای به دست آوردن روابط میان داده‌های مادون قرمز و مایکروویو غیرفعال که برای تولید تخمین‌های بارش استفاده می‌شوند، به کار می‌برد.

TRMM اولین ماهواره‌ای بود که با هدف اندازه‌گیری بارش ساخته شد. این ماهواره محصول یک پروژه تحقیقاتی مشترک بین سازمان ناسا از ایالات متحده آمریکا و آژانس ملی توسعه فضایی ژاپن می‌باشد. TRMM در مرکز پرواز فضایی Goddard در ناسا ساخته و به طور موفقیت‌آمیزی در ۲۷ نوامبر ۱۹۹۷ از ژاپن به فضا پرتاب شد. TRMM برای تخمین بارش حاره‌ای توسط سنجنده‌های فضایی و استفاده از مجموعه‌ای از الگوریتم‌های بازیابی بارش به کار می‌رود. سیستم رصدخانه شامل یک رادار بارش، یک رادیو متر مایکروویو چند فرکانسی و یک رادیو متر مادون قرمز مرئی می‌باشد. رادیومتر مایکروویو چند فرکانسی، اطلاعاتی را مانند مقدار بارش، شدت بارش و توزیع سطحی آن تهیه می‌کند. این مدل چند فرکانسی در پنج فرکانس مختلف (۱۰/۶۵، ۱۹/۳۵، ۲۲/۳۵، ۳۷ و ۸۵/۵ گیگاهرتز) با دقت افقی از ۵ کیلومتر (۸۵/۵ گیگاهرتز) تا ۴۵ کیلومتر (۱۰/۶۵ گیگاهرتز) عمل می‌کند. اسکنر مادون قرمز مرئی (VIRS) اطلاعات با دقت بالایی را از انواع ابر، منطقه زیرپوشش آن و دماهای بالای ابر با استفاده از پنج کانال رادیومتری (۰/۶۳، ۱/۶، ۳/۷۵، ۱۰/۸ و ۱۲ میکرون) تهیه می‌کند. اسکنر مادون قرمز مرئی بارندگی را از دماهای بالای ابر در یک دقت افقی ۲/۱ کیلومتر تخمین می‌زند. داده‌های بارش چند ماهواره‌ای TRMM بر اساس الگوریتمی است که مشاهدات مایکروویو و مادون قرمز را با هم ترکیب می‌کند. تخمین‌های مایکروویو خیلی دقیق‌تر از تخمین‌های مادون قرمز هستند. از طرف دیگر، نمونه‌برداری ماهواره مادون قرمز از نمونه‌برداری مایکروویو دارای فراوانی بیشتری است. هنگام تولید شبکه‌ای از داده‌های TRMM، ابتدا تخمین‌های مایکروویو که دقیق‌ترند استفاده شده، سپس خلاً تخمین‌های مایکروویو با داده‌های مادون قرمز پر می‌شود. نسخه ۷ محصولات بارش چند ماهواره‌ای TRMM^۳ که مورد استفاده در این تحقیق می‌باشند، با دقت مکانی 0.25×0.25 درجه و زمانی ۳ ساعته درون ۵۰ درجه شمالی و ۵۰ درجه جنوبی عرض سرتاسری جغرافیایی در دسترس هستند. برآوردهای بارش TMPA به دو صورت شامل (۱) محصول برآورد بارش در نزدیک زمان

واقعی 3B42RT نامیده می‌شود و (۲) محصول برآورد بارش بعد از زمان واقعی^۴ که خطای آن‌ها تا حدی تصحیح شده^۵ است و -TMPA 3B42V7 نام دارد، در دسترس می‌باشند. در واقع محصول -TMPA 3B42V7 آخرین نسخه از محصولات بارش ماهانه مربوط به ایستگاه‌های زمینی را از مرکز اقلیم‌شناسی بارش سرتاسری^۶ (GPCC) جهت تصحیح خطای برآورد بارش ماهواره TRMM به کار می‌گیرد. فرآیند تصحیح خطا شامل جمع کردن محصولات بارش ماهواره‌ای ۳ ساعته برای به دست آوردن محصول ماهانه می‌باشد، سپس نسبت برآورد بارش 3B42V7 به مقدار اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه زمینی به دست می‌آید. این نسبت در هر مقدار تخمین زده شده در گام‌های زمانی سه ساعته توسط 3B42V7 ضرب می‌شود تا خطای برآورد آن را تصحیح کند. بنابراین در فرآیند مذکور که نسبت به دست‌آمده توسط داده‌های ماهانه در مقادیر سه ساعته ضرب می‌شود، نمی‌تواند به طور قابل قبول و مطمئنی منجر به تصحیح خطا گردد. همچنین، مطالعات متعددی عدم قطعیت مربوط به محصول 3B42V7 را در مناطق مختلفی گزارش کرده‌اند (Jiang et al., 2012; Aghakouchak et al., 2011, Yong et al., 2012). TRMM دو مشخصه منحصر به فرد دارد که آن را برای مشاهده دستگاه‌های بارش حاره‌ای ایده‌آل می‌سازد و این شامل گروهی از ابزارهای مشاهداتی (رادار) و مشخصات مدار آن (عرض جغرافیایی پایین و غیر خورشید آهنگ) می‌باشد که دارای پوشش مکانی زیادی است. TRMM سه وسیله اصلی به نام‌های رادار بارش (PR⁷)، تصویر گیرنده مایکروویو TRMM (TMI) و اسکن کننده‌های مرئی و مادون قرمز دارد که برای اندازه‌گیری مقدار بارش حاره‌ای و زیر حاره‌ای به کار می‌روند.

۲- روش تحقیق

روش به کار رفته در این تحقیق برای تخمین رواناب حاصل از بارش در حوضه سد وشمگیر به کمک ترکیب تکنیک‌های GIS و RS و نرم‌افزار HEC-HMS انجام می‌گیرد. برای این منظور از محصولات بارش ماهواره TRMM و PERSIANN برای واسنج^۸ و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS استفاده شد. مدل اولیه HEC-HMS توسط نسخه ArcHydro 10.3 و نرم‌افزار WMS10.1 تولید شده و سپس وارد HEC-HMS شد و مدل بارش-رواناب برای فاصله زمانی ۵ ساله (۲۰۰۲-۲۰۰۷) توسعه یافت. برای شبیه‌سازی مناسب رواناب سعی شد تا بهترین بارش ماهواره که دارای بیشترین همبستگی با بارش‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد، انتخاب شود. بر همین اساس بارش‌های TRMM و PERSIANN با بارش‌های اندازه‌گیری شده در ۵ ایستگاه باران‌سنجی مقایسه شد تا بهترین محصول برای این کار انتخاب شود. برای شبیه‌سازی رواناب از

سد گرگان) یکی از سدهای اصلی بنا شده بر روی رودخانه گرگان رود می‌باشد که دارای حوضه‌ای به وسعت ۵۷۴۸ km² بوده و در قسمت شرقی حوضه گرگان‌رود و در فاصله ۵۰ کیلومتری شهر گرگان واقع شده است. هدف اولیه احداث سد، تنظیم و تقسیم ۳۲۵ میلیون مترمکعب آب زراعی سالانه برای آبیاری ۲۵۰۰۰ هکتار اراضی تحت کشت بوده است.

طول بلندترین رودخانه در حوضه این سد حدود ۵۹ کیلومتر بوده و ارتفاع حوضه از ۲ تا ۲۸۶۵ متر بالای سطح دریا متغیر می‌باشد. حوضه سد وشمگیر از نظر آب و هوایی و توپوگرافی غیر یکنواخت بوده و دارای شیب زیاد می‌باشد که آن را مستعد فرسایش خاک و سیلاب نموده است.

روش تلفات شماره منحنی (SCS-CN) در کنار روش هیدروگراف واحد SCS، و روش تلفات Deficit and Constant به همراه هیدروگراف واحد اشنایدر استفاده شد و بهترین روش از طریق واسنجی انتخاب گردید. سپس روش انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی رواناب و دبی حداکثر سیلاب به کار برده شد. شکل ۱ نمودار گردش روش کار در این تحقیق را نشان می‌دهد.

۳- منطقه مورد مطالعه

حوضه رودخانه گرگان‌رود با آب‌وهوای غالباً نیمه‌خشک و مساحت تقریبی ۱۳۰۶۱ km² در شمال کشور و در جنوب شرقی دریای خزر قرار گرفته است (شکل ۲). در این حوضه چهار سد با نام‌های بوستان، گلستان، وشمگیر و نومل در حال بهره‌برداری می‌باشند. سد وشمگیر

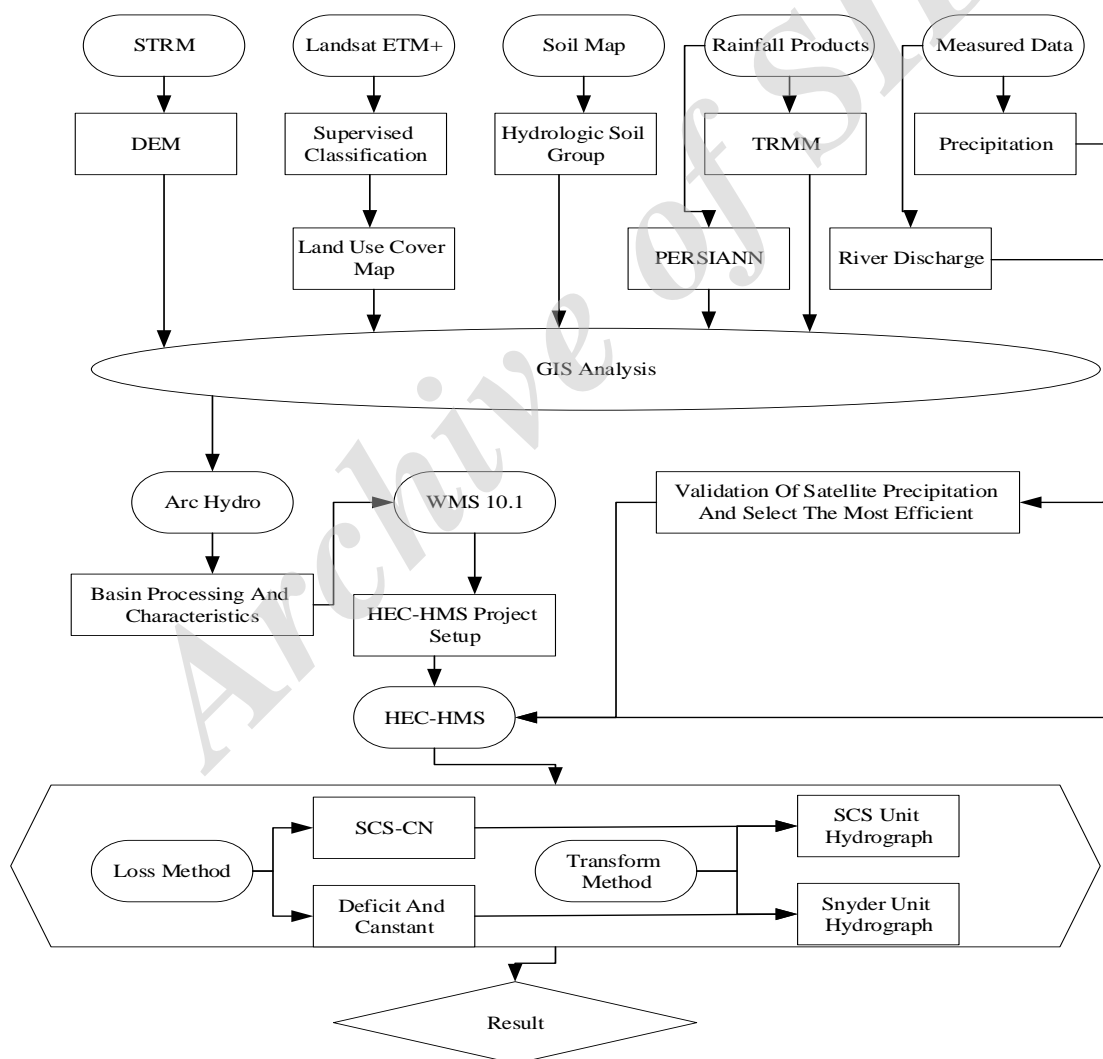


Fig. 1- The flowchart of the method used in this research to simulate the precipitation-runoff process

شکل ۱- نمودار گردش روش کار در این مطالعه برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب

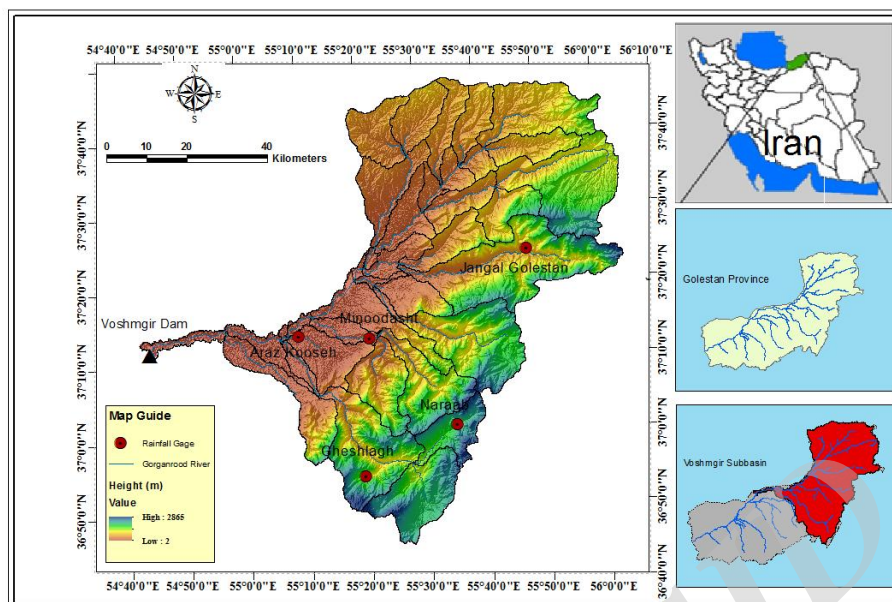


Fig. 2- Voshmgir Dam basin on Gorganrud River
 شکل ۲- موقعیت حوضه سد وشمگیر بر روی رودخانه گرگان رود

رقومی به قسمت‌های کوچک‌تر که دارای ابعاد یک درجه طولی و یک درجه عرضی می‌باشند و اندازه هر پیکسل آن ۹۰ متر بود، تقسیم شدند.

در این مطالعه از بارش‌های تخمینی توسط ماهواره TRMM و الگوریتم PERSIANN برای توسعه مدل بارش رواناب در HEC-HMS استفاده شد. داده‌های ماهواره TRMM به صورت فرمت NetCDF و در سه بازه زمانی سه ساعته، روزانه و ماهانه با قدرت تفکیک مکانی ۲۵ کیلومتر ($25^{\circ} \times 25^{\circ}$) و در بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۲ تا اکتبر ۲۰۰۷ از پایگاه <https://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/> تا اکتبر ۲۰۰۷ از پایگاه <http://chrsdata.eng.uci.edu/> نیز از پایگاه PERSIANN نیز از پایگاه <http://chrsdata.eng.uci.edu/> در بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۲ تا اکتبر ۲۰۰۷ دانلود شد. داده‌های بارش این الگوریتم نیز مانند ماهواره TRMM دارای قدرت تفکیک مکانی ۲۵ کیلومتر ($25^{\circ} \times 25^{\circ}$) می‌باشد که در نتیجه همپوشانی پیکسل‌های آن با منطقه مورد مطالعه مانند TRMM خواهد بود.

۲-۴- اطلاعات ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS، از داده‌های ایستگاه ثبت دبی روزانه در محل سد وشمگیر از ژانویه ۲۰۰۲ تا اکتبر ۲۰۰۷ استفاده شده است (شکل ۲). از دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری سد وشمگیر ثبت‌شده در فاصله ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در حالت پیوسته استفاده شد. حداقل و حداکثر دبی ثبت‌شده در

بارش در این حوضه دارای تغییرات شدید مکانی و زمانی بوده و میانگین سالانه ارتفاع آن به ۶۳۴ میلی‌متر می‌رسد و از ۲۴۱ میلی‌متر در ایستگاه تیل‌آباد تا ۱۰۹۰ میلی‌متر در ایستگاه گالیکش متغیر است (Arabkhedri et al., 2010). روند بارش در حوضه وشمگیر نشان می‌دهد که ۶۰٪ تمام بارش از ماه ژانویه تا ژوئن رخ می‌دهد و دمای میانگین سالانه حدود ۱۷/۹ درجه سانتی‌گراد است (Mostafazadeh and Sheikh, 2012). بارش در حوضه وشمگیر به شدت تحت تأثیر توپوگرافی بوده و بیشتر آن در قسمت غربی حوضه رخ می‌دهد و از قسمت غرب منطقه تا شرق آن سیر نزولی دارد.

۴- اطلاعات مورد استفاده

۴-۱- داده‌های ماهواره‌ای

برای استخراج حوضه آبریز سد وشمگیر و همچنین تولید اطلاعات بارش برای شبیه‌سازی فرآیند رواناب نیاز به اطلاعات ماهواره‌ای مختلف می‌باشد که در ادامه شرح داده خواهد شد.

برای استخراج خصوصیات فیزیکی حوضه آبریز از اطلاعات DEM برداشت شده توسط SRTM استفاده شد. SRTM با استفاده از روش اندازه‌گیری Radar Interferometry مدل رقومی زمین (DEM) را برای تمام سطح کره زمین فراهم می‌کند. در طول این مدت SRTM نقشه ارتفاعی کره زمین را از ۶۰ درجه شمالی تا ۵۶ درجه جنوبی تهیه کرد که تقریباً ۸۰٪ سطح کل زمین را در برمی‌گیرد. سپس نقشه‌های

ماهانه بارش ماهواره‌ای نیاز به پردازش تصاویر بسیار زیادی بود (برای مثال در مقیاس روزانه می‌بایست ۲۱۰۰ تصویر از هر محصول ماهواره‌ای پردازش می‌شد). به همین دلیل و برای سهولت انجام پردازش محصولات بارش ماهواره‌ای و تولید ورودی‌های مورد نیاز برای مدل HEC-HMS از ابزار Model Builder نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. بدین صورت که به کمک قابلیت Iterate Raster Tool تمام محصولات بارش ماهواره‌ای به کمک پردازش دسته‌ای^۹ مورد پردازش قرار گرفته و اطلاعات مورد نیاز (میانگین بارش در هر تصویر) برای ورود به مدل HEC-HMS از آن‌ها استخراج شدند.

۴-۴- پیکربندی مدل HEC-HMS به کمک ArcHydro10.2 و WMS10.1

اولین گام در ترسیم حوضه آبریز به کمک ArcHydro نقطه خروجی محل ایستگاه هیدرومتری سد و شمشگیر در نظر گرفته شد. سپس ArcHydro از DEM حوضه آبریز استفاده کرد. بعد از تعیین محدوده حوضه، تعریف زیر حوضه‌ها نیز در این محدوده ضروری می‌باشد.

این ایستگاه بین ۰ تا ۳۱۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳ می‌توان دید سیلابی با دبی ۳۱۰ مترمکعب در ثانیه در روز ۲۷م ژانویه سال ۲۰۰۷ در این ایستگاه ثبت شده است که از آن برای شبیه‌سازی جریان بر پایه رخداد استفاده شد. بارش تخمینی توسط ماهواره دارای خطا می‌باشد که از این رو برای صحت‌سنجی نتایج آن باید از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در ایستگاه‌های هواشناسی استفاده کرد (Habib et al., 2014). برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از تخمین بارش منطقه‌ای توسط ماهواره TRMM و PERSIANN، از اطلاعات بارش روزانه ثبت شده توسط ۵ ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه در فاصله زمانی ژانویه ۲۰۰۲ تا اکتبر ۲۰۰۷ استفاده شده است. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی در شکل ۲ و اطلاعات آماری آن‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است.

۳-۴- پیش‌پردازش محصولات بارش ماهواره TRMM و الگوریتم PERSIANN

در این مطالعه به دلیل شبیه‌سازی فرآیند روزانه بارش-رواناب در مدل HEC-HMS در بازه زمانی ۵ ساله و استفاده از داده‌های روزانه و

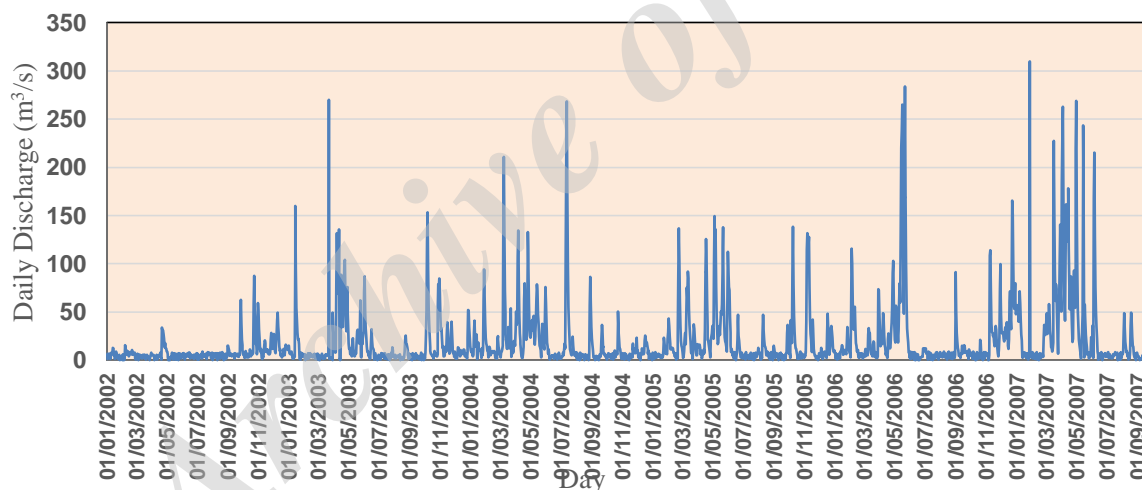


Fig. 3- The hydrograph of the daily discharge measured at Voshmgir dam station from January 2002 to October 2007

شکل ۳- هیدروگراف روزانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه سد و شمشگیر در بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۲ تا اکتبر ۲۰۰۷

Table 1- The statistical parameters recorded by the weather stations

جدول ۱- پارامترهای آماری ایستگاه‌های هواشناسی

| | Latitude | Longitude | Operational since | Average annual (mm) rainfall | Standard deviation (mm) |
|-----------------|----------|-----------|-------------------|------------------------------|-------------------------|
| Araz Kooseh | 37.13 | 55.05 | 1966 | 507.5 | 47.11 |
| Gheshlagh | 36.54 | 55.19 | 1964 | 762.9 | 61.96 |
| Minoodasht | 37.14 | 55.22 | 1968 | 947.5 | 44.92 |
| Naraab | 37.01 | 55.35 | 1959 | 1199 | 31.47 |
| Jangal Golestan | 37.24 | 55.48 | 1963 | 946 | 24.88 |

نوع اطلاعات دارد. (۱) مدل حوضه که شامل پارامترها و اتصال اطلاعات برای اجزاء هیدرولوژیکی می‌باشد. این اجزا شامل زیر حوضه، روندیابی آبراهه‌ها^۲، تقاطع، مخزن^۳، منبع^۴، زهکش^۵ و بند انحرافی^۶ می‌باشند. (۲) مدل بارش که شامل اطلاعات هواشناسی و اطلاعات لازم برای اجرای آن‌ها می‌باشد. (۳) تعیین کنترل^۷ که شامل اطلاعات تعیین بازه زمانی شبیه‌سازی می‌باشد.

بدین ترتیب حوضه آبریز مذکور به ۳۵ زیر حوضه تقسیم شد که مساحت آن‌ها از ۷/۲۷ تا ۶۰۹ کیلومتر مربع متغیر می‌باشد. در کنار مساحت زیر حوضه‌ها ArcHydro طول هر رودخانه در هر زیر حوضه و محل تقاطع زیر حوضه‌ها را نیز به کمک DEM ترسیم می‌کند. با توجه به محاسبات انجام‌شده توسط این نرم‌افزار طول آبراهه‌های حوضه از ۳ تا ۵۹ کیلومتر متغیر می‌باشد.

حدود ۹ روش مختلف برای محاسبه تلفات در HEC-HMS قرار داده شده است که بعضی از این روش‌ها برای شبیه‌سازی پیوسته^۸ و برخی نیز برای شبیه‌سازی بر پایه رخداد^۹ طراحی شده‌اند (Gumindoga et al., 2014) از میان روش‌ها، دو روش SCS-CN و Deficit and Consntat برای مطالعات شبیه‌سازی به دلیل سادگی و نیاز به پارامترهای کمتر، زیاد استفاده شده‌اند (Fotopoulos et al., 2010; Gumindoga et al., 2014; Habib et al., 2014; Kibena et al., 2014; Pappenberger et al., 2015). از سوی دیگر ۷ روش انتقال در HEC-HMS وجود دارد که بعضی از این روش‌ها به دلیل نیاز به ورودی‌های متعدد که غالباً در دسترس نیستند، سخت و پیچیده هستند (Habib et al., 2014). در میان این روش‌ها روش هیدروگراف واحد (Fang et al., 2005; Yilma and Moges, 2007) شناخیدر (Hunukumbura et al., 2008) به‌طور موفقی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

پس از رسم خصوصیات فیزیکی حوضه توسط ArcHydro این اطلاعات وارد نرم‌افزار WMS10.1 شد تا به کمک آن بتوان مدل اولیه HEC-HMS را تولید نمود. WMS قابلیت محاسبه پارامترهای مدل HEC-HMS، را از روی اطلاعات مکانی دارا می‌باشد، به‌طوری‌که بعد از محاسبه این پارامترها می‌توان آن را به فرمت HEC-HMS ذخیره نموده و آن را در HEC-HMS برای انجام محاسبات بعدی باز نمود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مدل HEC-HMS تولید شده توسط WMS دارای ۳۵ زیر حوضه، ۱۸ تقاطع^{۱۰} (محل اتصال آبراهه) و ۱۷ آبراهه^{۱۱} می‌باشد.

۴-۵- کاربرد HEC-HMS

مدل HEC-HMS روش‌های متنوعی را برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب مهیا ساخته که محاسبات از جهت بالادست به پایین دست انجام می‌گیرد. اجرای مدل HEC-HMS نیاز به تعیین سه

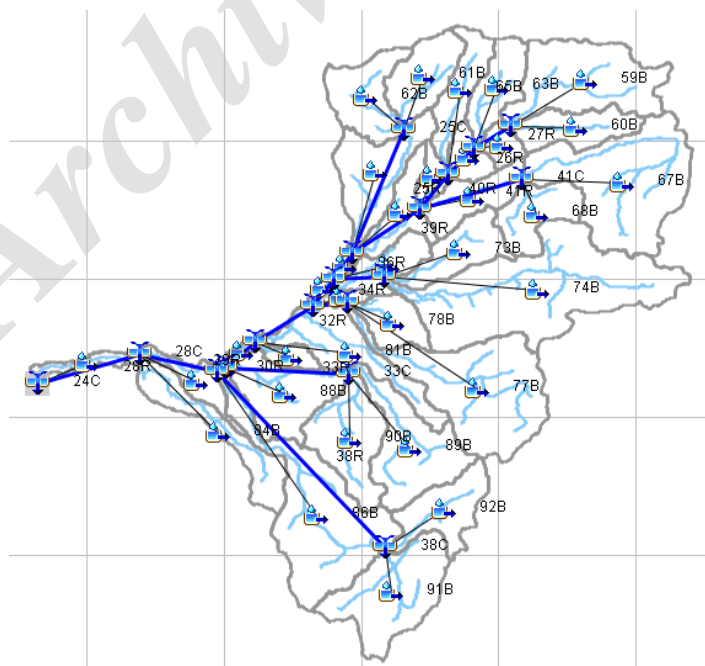


Fig. 4- A schematic of the HEC-HMS model with sub-basins and reaches developed in WMS10.1
شکل ۴- شمایی از مدل HEC-HMS توسعه یافته با زیر حوضه‌ها و آبراهه‌های آن توسط WMS10.1

بنابراین این مطالعه با استفاده از دو روش تلفات شماره منحنی (SCS-CN) در کنار روش هیدروگراف واحد SCS، و روش تلفات Deficit and Constant به همراه هیدروگراف واحد اشنایدر استفاده کرد.

۴-۵-۱- واسنجی مدل

در این مطالعه در حالت پیوسته مدل بارش-رواناب در حوضه مورد مطالعه واسنجی شد (Habib et al., 2014). از بازه اول (۲۰۰۴-۲۰۰۲) برای فرآیند واسنجی و از بازه دوم (۲۰۰۷-۲۰۰۵) برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. اطلاعات روزانه بارش در فاصله سه ساله (۲۰۰۴-۲۰۰۲) و دبی اندازه‌گیری شده در این فاصله برای شبیه‌سازی وارد مدل شد و مدل با دو روش SCS و Deficit and Constant در گام‌های زمانی یک‌روزه اجرا و واسنجی شد تا بتوان مدل مناسب را جهت مطالعه فرآیند بارش-رواناب حوضه انتخاب نمود. مدل انتخاب شده برای شبیه‌سازی سیلاب رخ داده در روز ۲۷م ژانویه سال ۲۰۰۷ با دبی ۳۱۰ مترمکعب در ثانیه در حالت بر پایه رخداد استفاده شد. برای اجرای مدل بارش-رواناب از بارش ماهواره‌ای استفاده شد که بر اساس معیارهای RMSE، MBE و MAE بیشترین همبستگی را با بارش‌های اندازه‌گیری شده داشت.

۴-۵-۲- ارزیابی مدل‌ها

چگونگی اجرای مدل در این مطالعه برای شبیه‌سازی دبی روزانه و ماهانه به کمک دبی مشاهده‌شده ارزیابی شد. سه شاخص آماری راندمان نش-ساتکلیف^{۲۰} (NSE)، ضریب تعیین^{۲۱} (R²) و خطای حجمی نسبی^{۲۲} (RVE) برای این ارزیابی استفاده شد (Fotopoulos et al., 2010).

الف) راندمان نش-ساتکلیف

این ضریب به صورت معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs(t)} - Q_{sim(t)})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (1)$$

که در این معادله NSE راندمان نش-ساتکلیف، $\bar{Q}_{obs(t)}$ دبی مشاهده‌شده در زمان t ، $\bar{Q}_{sim(t)}$ دبی شبیه‌سازی‌شده در زمان t و \bar{Q}_{obs} میانگین دبی مشاهده‌شده می‌باشد (Nash & Sutcliffe, 1970). مقادیر ضریب NSE از $-\infty$ تا ۱ متغیر می‌باشد. با افزایش دقت مدل این مقدار افزایش یافته و در حالت ایده‌آل زمانی که دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهده شده کاملاً با هم تطابق داشته باشند به عدد ۱ می‌رسد (Bhattarai, 2013).

ب) ضریب تعیین (R²)

دیگر ضریب پرکاربرد مورد استفاده در آمار ضریب تعیین می‌باشد که از معادله (۲) قابل محاسبه است:

$$R^2 = \frac{(\sum (Q_{obs(t)} - \bar{Q}_{obs}) \sum (Q_{sim(t)} - \bar{Q}_{sim(t)}))^2}{\sum (Q_{obs(t)} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum (Q_{sim(t)} - \bar{Q}_{sim(t)})^2} \quad (2)$$

که در این معادله Q_{obs} و Q_{sim} دبی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، \bar{Q}_{obs} و \bar{Q}_{sim} میانگین دبی مشاهده‌شده و محاسبه شده می‌باشند. ضریب تعیین از ۰ تا ۱ متغیر است و مقادیر بالاتر نشان‌دهنده برازش بهتر خط رگرسیون میان دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهده شده می‌باشد. وقتی دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده کاملاً منطبق بر هم باشند مقدار ۱ به دست خواهد آمد.

ج) خطای حجمی نسبی

خطای حجمی نسبی از معادله زیر به دست آید (Fotopoulos et al., 2010):

$$RVE = \frac{\sum (Q_{sim(t)} - Q_{obs(t)})}{\sum Q_{obs(t)}} \times 100 \quad (3)$$

که در این معادله $Q_{obs(t)}$ دبی مشاهده شده در زمان t و $Q_{sim(t)}$ دبی شبیه‌سازی‌شده در زمان t می‌باشد. RVE از $-\infty$ تا $+\infty$ متغیر می‌باشد. شبیه‌سازی مدل زمانی خوب است که RVE در محدوده -5% تا $+5\%$ قرار گیرد، درحالی‌که مقادیر بین -10% تا -5% و 5% تا 10% نشان‌دهنده شبیه‌سازی قابل قبول با توجه به خطای حجمی می‌باشد.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- صحت‌سنجی بارش ماهواره‌ای

برای استفاده از بارش‌های ماهواره‌ای در مدل HEC-HMS ابتدا نیاز است تا صحت بارش تخمینی توسط ماهواره به کمک اندازه‌گیری‌های زمینی بررسی شود. از این رو از اطلاعات روزانه بارش اندازه‌گیری شده در ۵ ایستگاه موجود در سطح منطقه برای صحت‌سنجی بارش روزانه TRMM و PERSIANN استفاده شد. مطابق با نتایج صحت‌سنجی ارائه شده در جدول ۲، مشاهده می‌شود که هیچ‌کدام از دو بارش ماهواره‌ای در مقیاس روزانه عملکرد مناسبی را با توجه به مقادیر RMSE، MBE، MAE و R² از خود نشان نمی‌دهند. این نتیجه مشابه نتایج به‌دست آمده توسط Li et al. (2012) می‌باشد که در مطالعه خود در مقیاس روزانه به همبستگی بالایی میان بارش TRMM و بارش اندازه‌گیری شده دست نیافتند و نتایج آن‌ها نشان داد که در مقیاس ماهانه TRMM دارای عملکرد بهتری نسبت به مقیاس روزانه با بارش اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده توسط Arias-Hidalgo et al. (2012) نیز این امر را تأیید می‌کند که مقیاس ماهانه در مورد مقیاس روزانه همبستگی بهتری را با داده‌های بارش اندازه‌گیری شده دارد. همان‌طور که در

تعدیل مقدار CN تا جایی ادامه پیدا نمود تا مقادیر پارامترهای ذکر شده در حد مطلوب خود قرار گیرند. جدول ۳ مقدار پارامترهای آماری به دست آمده را برای مقادیر مختلف CN نشان می‌دهد. مقادیر پارامترهای آماری در اجرای مدل با CN وزنی به دست آمده از نقشه CN نشان داد که مدل نتیجه مطلوبی را با CN وزنی نخواهد داشت. مطابق جدول ۲ هرچه مقدار CN کاهش می‌یابد مقدار پارامترهای آماری بهبود یافته تا اینکه بهترین نتیجه در $CN=40$ با مقادیر NSE، R^2 و RVE به ترتیب 0.205 ، 0.363 و -0.650 به دست آمد. در $CN=20$ نیز نتایج مانند نتایج CNهای با مقادیر بالا مطلوب نبود. نتایج به دست آمده توسط روش CN مطابقت زیادی با نتایج به دست آمده توسط (Najim 2012) دارد که در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که CN وزنی یک مقدار اولیه بوده و مدل در همه موارد نتیجه مطلوبی را با مقادیر آن در شبیه‌سازی رواناب نشان نخواهد داد.

از نتایج به دست آمده (جدول ۳) می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از جداول استاندارد SCS منجر به ایجاد خطاهای بالا در تخمین‌های رواناب می‌شود. قبل از کاربرد روش استاندارد SCS می‌بایست مناسب بودن آن مورد بررسی قرار گرفته یا توسط روشی که مقادیر CN را از اطلاعات رواناب محلی استخراج می‌کند، جایگزین شود (Muzik, 1993). (Senay and Verdin 2004) بیان کردند که استفاده از روش SCS در حوضه‌های بزرگ هنگامی که هدررفت‌های طبیعی در نظر گرفته نمی‌شوند، ممکن است باعث تخمین بیش از حد رواناب شود.

۵-۲-۲- روش تلفات Deficit and Constant و روش هیدروگراف واحد اشنایدر

به دلیل وجود عدم قطعیت در روش SCS تلفات Deficit and constant با روش هیدروگراف واحد اشنایدر مورد استفاده قرار گرفت. این روش به مقادیر تلفات اولیه (mm)، ذخیره حداکثر^{۳۳} (mm)، نرخ ثابت^{۳۴} (mm/h) و نفوذناپذیری^{۳۵} (%) نیازمند می‌باشد.

جدول ۱ می‌توان دید TRMM با مقادیر میانگین MAE، MBE و R^2 به ترتیب برابر با $2/43$ ، $1/11$ و $0/056$ دقت بیشتری را نسبت به PERSIANN در تخمین بارش از خود نشان می‌دهد. PERSIANN فقط در مقادیر RMSE دقت بهتری را نسبت به TRMM دارا می‌باشد. در مقایسه ایستگاهی بهترین مقادیر MAE، MBE و R^2 در ایستگاه آراز کوسه، مینودشت و جنگل گلستان در بارش TRMM رخ می‌دهد و بهترین مقدار RMSE نیز در ایستگاه آراز کوسه و در بارش PERSIANN اتفاق می‌افتد.

مقادیر مثبت پارامتر MBE نشان می‌دهد که هر دو محصول تمایل به تخمین کمتر از حد بارش در منطقه دارند که این میزان برای TRMM کمتر از PERSIANN است. مقایسه دو محصول بارش ماهواره‌ای نشان می‌دهد به‌طور کلی TRMM دقت بهتری را نسبت به PERSIANN در تخمین بارش از خود نشان می‌دهد. از این رو در ادامه مطالعه و برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب از بارش‌های روزانه TRMM در مدل HEC-HMS استفاده شد.

۵-۲-۱- واسنجی مدل

۵-۲-۱- روش تلفات SCS-CN و روش هیدروگراف واحد SCS

مطابق شکل ۵ از روش شماره منحنی (CN) برای تخمین رواناب حوضه مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر CN بر اساس نقشه کاربری اراضی پهنه‌بندی و برای هر منطقه‌ای اعمال گردید. مقادیر بالای CN نشان‌دهنده رواناب بیشتر بوده و CN برابر با ۱۰۰ یعنی تمام بارش تبدیل به رواناب می‌شود. مقدار CN حتی برای سطوح نفوذناپذیر از مقدار ۹۸ تجاوز نمی‌کند، از این رو مقدار کمی از بارش توسط سطح نگه‌داشته می‌شود (Hunukumbura et al., 2008).

فرآیند واسنجی در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ و با تعدیل نمودن مقدار CN ادامه پیدا کرد. مدل ابتدا با مقدار اولیه CN وزنی اجرا شده و مقادیر پارامترهای آماری NSE، R^2 و RVE محاسبه شدند. فرآیند

Table 2- A statistical comparison of precipitation estimated by TRMM and PERSIANN in the five stations over the study area

جدول ۲- مقایسه آماری بارش اندازه‌گیری شده با بارش TRMM و PERSIANN در پنج ایستگاه موجود در منطقه

| Station Name | PERSIANN | | | | TRMM | | | |
|-----------------|----------------|------|------|------|----------------|-------|------|-------------|
| | R ² | MBE | MAE | RMSE | R ² | MBE | MAE | RMSE |
| Araz kooseh | 0.023 | 2.62 | 3.05 | 3.67 | 0.055 | -0.85 | 1.59 | 4.79 |
| Gheshlagh | 0.018 | 3.22 | 3.63 | 4.34 | 0.044 | -0.74 | 1.67 | 4.79 |
| Minoodasht | 0.017 | 3.14 | 3.53 | 4.22 | 0.049 | 0.32 | 2.38 | 4.66 |
| Naraab | 0.015 | 3.17 | 3.59 | 4.26 | 0.062 | 1.90 | 3.39 | 4.45 |
| Jangal Golestan | 0.026 | 3.07 | 3.49 | 4.16 | 0.072 | 1.13 | 3.16 | 4.7 |
| Mean | 0.019 | 3.04 | 3.45 | 4.13 | 0.056 | 1.11 | 2.43 | 4.76 |

روش از سعی و خطا و تغییر اعداد با گام ۰/۱ و اجرا کردن مدل تا رسیدن به بهترین حالت پارامترهای نش-ساتکلیف و PVE استفاده کردیم. شایان به ذکر است حدود ۲۰ سعی و خطا انجام شد. از آنجایی که روش تلفات Deficit and Constant در کنار روش هیدروگراف واحد اشنایدر دارای نتایج بهتری نسبت به بهترین حالت روش SCS (CN=۴۰) می‌باشد در مراحل بعدی از این روش برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب و همچنین تخمین دبی حداکثر سیلاب استفاده شد.

۵-۳- صحت‌سنجی مدل

در این مرحله برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از روش Deficit and Constant برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در سطح حوضه در مرحله واسنجی (۲۰۰۲-۲۰۰۴) از اطلاعات دبی روزانه مشاهده‌شده در فاصله مهر و موم‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ استفاده شد. نمودار ۶ دبی مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل را در مهر و موم‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ نشان می‌دهد.

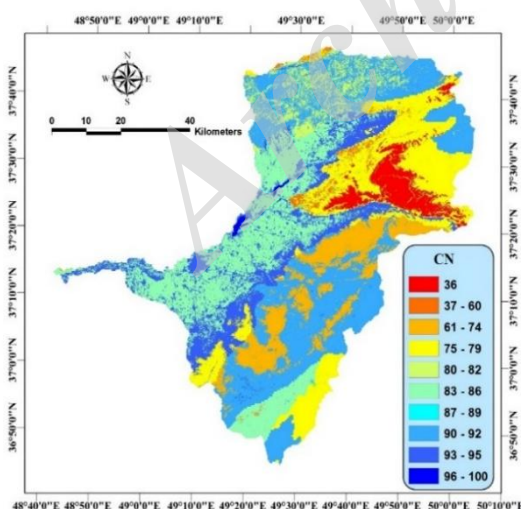
نتایج حاصل از صحت‌سنجی با مقادیر NSE، R² و RVE به ترتیب ۰/۶۲۱، ۰/۶۷۰ و -۰/۳۲۹ نشان می‌دهد که در مرحله صحت‌سنجی مدل نتایج بهتری را نسبت به مرحله واسنجی نشان می‌دهد. نتایج دبی محاسبه شده در مرحله صحت‌سنجی به دلیل داشتن الگوی یکسان با دبی مشاهده شده نتایج به‌دست آمده از واسنجی را تأیید می‌کند.

Table 3- The values of the NSE, R², and RVE statistical parameters for different CN values in the calibration phase (2002 to 2004)

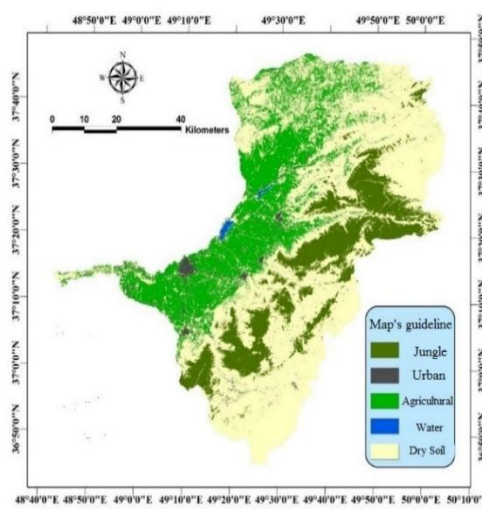
جدول ۳- مقدار پارامترهای آماری NSE، R² و RVE برای مقادیر مختلف CN در مرحله واسنجی (۲۰۰۲-۲۰۰۴)

| CN | R ² | RVE | NSE |
|----|----------------|--------|---------------|
| 71 | 0.310 | -0.385 | -0.082 |
| 65 | 0.328 | -0.427 | -0.004 |
| 60 | 0.336 | -0.465 | 0.057 |
| 55 | 0.344 | -0.507 | 0.112 |
| 50 | 0.351 | -0.551 | 0.158 |
| 45 | 0.358 | -0.598 | 0.191 |
| 40 | 0.363 | -0.650 | 0.205 |
| 20 | 0.316 | -0.893 | -0.038 |

روش هیدروگراف واحد اشنایدر نیز به تأخیر استاندارد^{۲۶} (ساعت) و ضریب حداکثر^{۲۷} نیاز دارد. مدل ابتدا با مقادیر پارامترهای محاسبه شده توسط خود مدل اجرا شد و مقادیر پارامترهای آماری NSE، R² و RVE برای بررسی دقت آن محاسبه شدند. برای رسیدن به بهترین نتایج که همراه با مقادیر مناسب پارامترهای آماری می‌باشد، پارامترهای روش Deficit and Constant شامل تلفات اولیه، ذخیره حداکثر و نرخ ثابت و پارامتر ضریب حداکثر روش اشنایدر تغییر یافتند. جدول ۴ مقادیر پارامترهای ذکر شده را در بهترین حالت (NSE، R² و RVE به ترتیب ۰/۴۱۳، ۰/۴۸۲، -۰/۲۴۶) نشان می‌دهد. ما در این



(ب)



(الف)

Fig. 5- A) The land use map produced by the Landsat ETM+ satellite, and B) CN map
شکل ۵- (الف) نقشه کاربری اراضی استخراج شده از ماهواره Landsat ETM+ و (ب) نقشه شماره منحنی

Table 4- The parameters of the deficit and constant loss method and Snyder's unit hydrograph method for the best values of NSE, R², and RVE in the calibration period (2002-2004)

جدول ۴- پارامترهای روش تلفات Deficit and Constant و روش هیدروگراف واحد اشنايدر در بهترین مقادير پارامترهای NSE، R² و RVE در مرحله واسنجی (۲۰۰۲-۲۰۰۴)

| Standard Lag (hour) | Snyder hydrograph | | Deficit and Constant | |
|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| | Peaking Coefficient | Constant Rate (mm/h) | Maximum Storage (mm) | Initial loss (mm) |
| 5.94 | 0.48 | 0 | 25 | 20 |

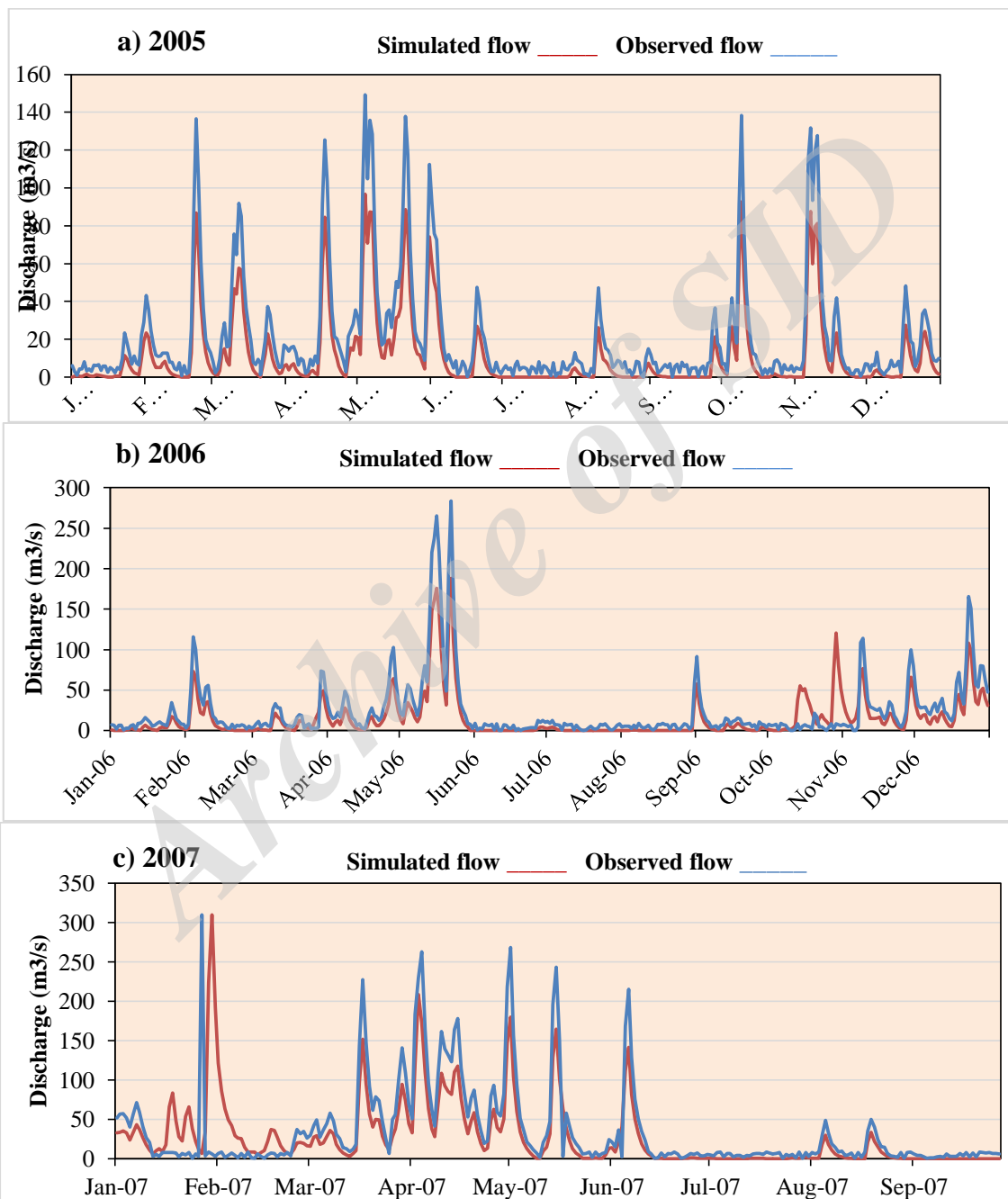


Fig. 6- The observed and calculated daily flow rates: a) year 2005, b) year 2006, and c) year 2007
شکل ۶- دبی روزانه مشاهده شده و محاسبه شده (الف) سال ۲۰۰۵، (ب) سال ۲۰۰۶ و (ج) سال ۲۰۰۷

مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که در مقیاس ماهانه دبی شبیه‌سازی شده نتایج بهتری را در مقایسه با دبی شبیه‌سازی شده روزانه نشان می‌دهد.

۴-۵- شبیه‌سازی سیلاب بر پایه رخداد

در این بخش از مطالعه سعی شد تا توانایی کاربرد مدل را برای تخمین سیلاب مشخص مورد بررسی قرارداد. برای این منظور از سیلاب رخ داده در روز ۲۷ ام ژانویه سال ۲۰۰۷ به‌عنوان دبی مشاهده‌ای استفاده شده و توانایی مدل در تخمین مقدار دبی حداکثر و زمان آن در مقایسه با دبی مشاهده شده مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این کار شبیه‌سازی جریان علاوه بر گام‌های زمانی یک‌روزه در گام‌های زمانی ۳ ساعته نیز انجام شد تا بتوان سیلاب را با دقت بیشتری تخمین زد. شکل ۸ مقایسه میان دبی سیلاب مشاهده شده و محاسبه شده در بازه‌های زمانی یک‌روزه و ۳ ساعته را توسط بارش روزانه و ۳ ساعته TRMM نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود در حالت شبیه‌سازی ۳ ساعته مدل دبی سیلاب را بهتر از حالت روزانه تخمین می‌زند، به‌طوری‌که در حالت ۳ ساعته دبی سیلاب با ۱ روز تأخیر نسبت به دبی مشاهده شده در ۲۸ ام ژانویه ۲۰۰۷ رخ می‌دهد درحالی‌که در حالت روزانه دبی سیلاب با ۳ روز تأخیر نسبت به دبی مشاهده شده در ۳۰ ام ژانویه ۲۰۰۷ رخ می‌دهد. نتایج مقایسه عددی نشان داده شده در جدول ۵ بیانگر این مطلب می‌باشد که در حالت شبیه‌سازی ۳ ساعته دبی سیلاب بسیار نزدیک به دبی مشاهده شده می‌باشد، درحالی‌که هر دو شبیه‌سازی تمایل به تخمین کمتر از حد دبی دارند.

Fang et al. (2005) بیان نمود که در روش اشنایدر فرض می‌شود که زمان تأخیر برای یک حوضه خاص ثابت می‌باشد و تحت تأثیر تغییر در شدت بارش نمی‌باشد. (Hunukumbura et al. (2008) از روش هیدروگراف واحد اشنایدر به‌عنوان روش انتقال برای تخمین رواناب در حوضه کوتماله^{۲۸} استفاده کرد و نتیجه گرفت که با وجود تخمین‌های منطقی جریان مدل قادر به تخمین دقیق جریان در مقابل تغییرات کاربری اراضی در این حوضه نخواهد بود.

Yilma and Moges (2007) از مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی رواناب کوتاه‌مدت و بلندمدت حوضه رودخانه نیل در اتیوپی استفاده کرد. روش هیدروگراف واحد اشنایدر و جریان پایه بهترین مدل برای تخمین سیلاب کوتاه‌مدت شناخته شدند. مطابق با معیاری همسان روش Deficit and Constant و هیدروگراف واحد اشنایدر برای شبیه‌سازی سیلاب نتایج مطلوبی را برای شبیه‌سازی طولانی‌مدت حاصل نمودند. (Kalita (2008 نیز از مدل HEC-HMS برای تخمین سیلاب در جنوب Brahmaputra به کمک روش هیدروگراف واحد اشنایدر استفاده کرد.

شکل ۷ مقایسه دبی ماهانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل را در فرآیند صحت‌سنجی (۲۰۰۵-۲۰۰۷) نشان می‌دهد. مطابق این شکل می‌توان مشاهده کرد که در مقیاس ماهانه دبی شبیه‌سازی شده نسبت به حالت روزانه مطابقت بهتری با دبی اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. به‌طوری‌که مقدار NSE از ۰/۶۲۱ به ۰/۶۶۴، R^2 از ۰/۶۷۰ به ۰/۸۱۳ و PVE از -۰/۳۲۹ به -۰/۳۲۷ ارتقا می‌یابند. این نتایج مطابق نتایج به‌دست آمده توسط (Fotopoulos et al., 2010; Gumindoga et al., 2014; Habib et al., 2014) می‌باشد که در

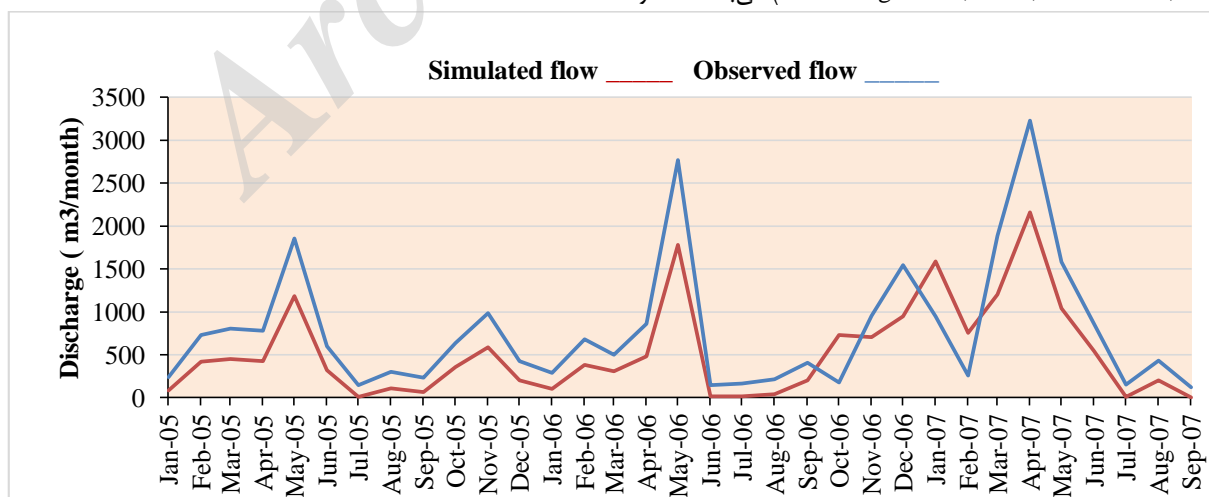


Fig. 7- The observed and calculated monthly flow rates recorded from 2005 to 2007

شکل ۷- دبی ماهانه مشاهده شده و محاسبه شده در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۵

آشنایدر با مقادیر R^2 ، NSE و RVE به ترتیب ۰/۴۱۳، ۰/۴۸۲ و ۰/۲۴۶- دارای نتایج بهتری نسبت به بهترین حالت روش SCS (CN=۴۰) با مقادیر، R^2 و RVE به ترتیب ۰/۲۰۵، ۰/۳۶۳ و ۰/۶۵۰ می‌باشد.

ازاین‌رو در ادامه محاسبات و برای شبیه‌سازی جریان پیوسته رودخانه و تخمین دبی حداکثر سیلاب از روش Deficit and Constant و هیدروگراف واحد آشنایدر استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی روش Deficit and Constant در حالت پیوسته و در فاصله سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ نشان داد که در مرحله صحت‌سنجی مدل نتایج بهتری را نسبت به مرحله واسنجی نشان می‌دهد و نتایج دبی محاسبه شده در مرحله صحت‌سنجی به دلیل داشتن الگوی یکسان با دبی مشاهده شده نتایج به‌دست آمده از واسنجی را تأیید می‌کند. شبیه‌سازی دبی ماهانه توسط مدل نشان داد که در مقیاس ماهانه دبی شبیه‌سازی‌شده نسبت به حالت روزانه مطابقت بهتری با دبی اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد، به‌طوری‌که مقدار NSE از ۰/۶۲۱ تا ۰/۶۶۴، R^2 از ۰/۶۷۰ به ۰/۸۱۳ و PVE از ۰/۳۲۹ به ۰/۳۲۷- ارتقا می‌یابند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیلاب رخ داده در روز ۲۷ ام ژانویه سال ۲۰۰۷ به کمک بارش‌های روزانه و ۳ ساعته TRMM نشان داد که در حالت شبیه‌سازی ۳ ساعته مدل دبی سیلاب را بهتر از حالت روزانه تخمین می‌زند، به‌طوری‌که در حالت ۳ ساعته دبی سیلاب با ۱ روز تأخیر و اختلاف ۱۴/۴ مترمکعب در ثانیه نسبت به دبی مشاهده شده در ۲۸ ام ژانویه ۲۰۰۷ رخ می‌دهد درحالی‌که در حالت روزانه دبی سیلاب با ۳ روز تأخیر و اختلاف ۱۲۱/۲ مترمکعب در ثانیه نسبت به دبی مشاهده شده در ۳۰ ام ژانویه ۲۰۰۷ رخ می‌دهد.

در این مطالعه از مدل HEC-HMS 4.1 برای شبیه‌سازی رواناب و تخمین دبی سیلاب در حوضه سد وشمگیر استفاده شد. اطلاعات هیدرومتئورولوژیکی از منابع مختلف شامل مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط ماهواره به دست آمدند. درهرحال اطلاعات اندازه‌گیری شده بارش در منطقه بسیار محدود بوده و برای غلبه بر این محدودیت در این مطالعه از تخمین‌های بارش ماهواره‌ای استفاده شد. برای این منظور از محصولات بارش ماهواره TRMM و PERSIANN برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS ArcHydro 10.3 استفاده شد. مدل اولیه HEC-HMS توسط نسخه ArcHydro 10.3 و نرم‌افزار WMS10.1 تولید شده و سپس وارد HEC-HMS شد و مدل بارش-رواناب برای فاصله زمانی ۵ ساله (۲۰۰۲-۲۰۰۷) توسعه یافت. برای شبیه‌سازی مناسب رواناب سعی شد تا بهترین بارش ماهواره که دارای بیشترین همبستگی با بارش‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد، انتخاب شود. بر همین اساس بارش‌های TRMM و PERSIANN با بارش‌های اندازه‌گیری شده در ۵ ایستگاه باران‌سنجی مقایسه شد و نتایج نشان داد که TRMM با مقادیر میانگین MAE، MBE و R^2 به ترتیب برابر با ۲/۴۳، ۱/۱۱ و ۰/۵۶ دقت بیشتری را نسبت به PERSIANN در تخمین بارش از خود نشان می‌دهد. ازاین‌رو از بارش‌های روزانه این ماهواره برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل HEC-HMS استفاده شد. برای شبیه‌سازی رواناب از روش تلفات شماره منحنی (SCS-CN) در کنار روش هیدروگراف واحد SCS، و روش تلفات Deficit and Constant به همراه هیدروگراف واحد آشنایدر استفاده شد. برای انتخاب بهترین روش تلفات و انتقال ابتدا عمل واسنجی دو روش ذکر شده در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ صورت گرفت و نتایج نشان داد که روش تلفات Deficit and Constant در کنار روش هیدروگراف واحد

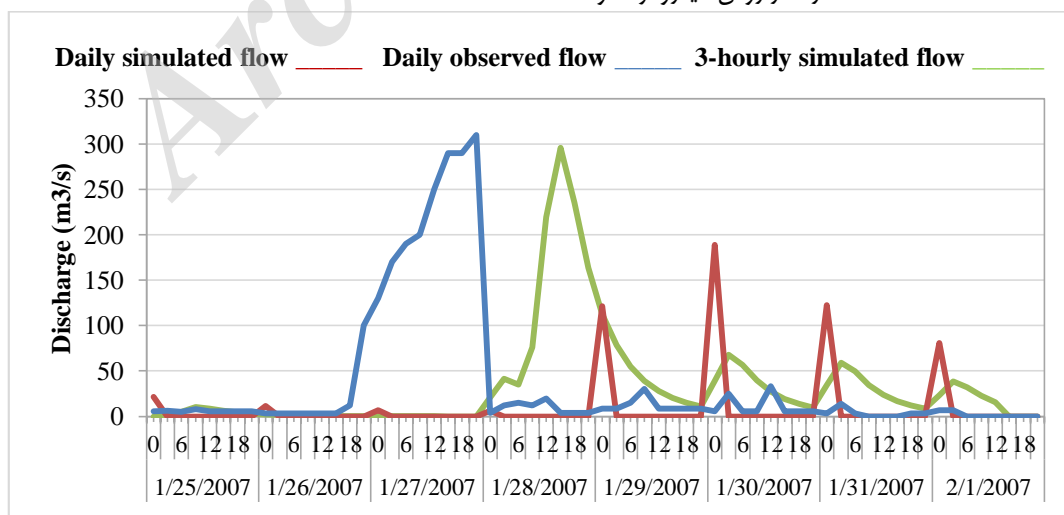


Fig. 8- The results of simulating the flow rate on January 27, 2007 with one-day and 3-hour time steps
شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی دبی سیلاب رخ داده در ۲۷ ام ژانویه سال ۲۰۰۷ در گام‌های زمانی یک‌روزه و ۳ ساعته

Table 5- The numerical comparison of the flow rate simulated for one one-day and one three-hour period using TRMM precipitation data

جدول ۵- مقایسه عددی دبی شبیه‌سازی شده در بازه زمانی یک‌روزه و سه ساعته به کمک بارش‌های TRMM

| Year | Dataset | Date of Peak | Hour of Peak | Difference in time(hrs) | Discharge (m3/s) | Difference in Discharge (m3/s) |
|------|--------------------|--------------|--------------|-------------------------|------------------|--------------------------------|
| 2007 | Daily observed | 27 Jan | 21 | | 310.0 | |
| | Daily simulated | 30 Jan | 0 | +51 | 188.8 | -121.2 |
| | 3-hourly simulated | 28 Jan | 15 | +18 | 295.6 | -14.4 |

- 17- Control Specifications
- 18- Continuous
- 19- Events Based
- 20- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)
- 21- Coefficient of Determination (R^2)
- 22- Percent Volume Error (PVE)
- 23- Maximum Storage
- 24- Constant Rate
- 25- Imperviousness
- 26- Standard Lag
- 27- Peaking Coefficient
- 28- Kotmale

۶- نتیجه‌گیری

مقایسه دو محصول بارش ماهواره‌ای در حوضه سد وشمگیر با ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی نشان داد که ماهواره TRMM در تحلیل‌ها در شاخص‌های RMSE، MBE، MAE و R^2 موفق‌تر از ماهواره PERSIANN عمل نمود. در هر دو ماهواره تجمع بارش در قسمت شمالی حوضه اتفاق افتاد. مدل صحت‌سنجی و واسنجی HEC-HMS 4.1 می‌تواند به‌عنوان مدلی قابل‌اعتماد در منطقه سد وشمگیر استفاده شود. مدل تلفات Deficit and Constant با مدل SCS-CN بهتر عمل نمود. مدل انتقال Snyder HU در مقابل مدل انتقال SCS HU کارآمدتر مشاهده شد. مدل انتقال هیدروگراف واحد اشنایدر به همراه روش تلفات نفوذ ثابت مدلی قابل‌اعتمادی برای حوضه سد وشمگیر پیشنهاد می‌گردد. در مدل‌های پیوسته مدل‌هایی با دوره‌های طولانی‌تر بهتر عمل نمود برای مثال مدل ماهانه دارای برتری عملکرد نسبت به مدل روزانه بوده و مقدار R^2 از ۰/۶۷ به ۰/۸۳ افزایش یافت. در مدل‌سازی بر پایه رخداد مدل با دوره کوتاه‌تر پاسخ بهتری را از خود نشان داد یعنی در حالت سه ساعته برای سیلاب مورد مطالعه نتایج بهتری در مقابل حالت روزانه استنتاج شد.

۷- مراجع

- Agbonkhese O, Agbonkhese E G, Aka E O, Joe-Abaya J, Ocholi M, Adekunle A (2014) Flood menace in Nigeria: impacts, remedial and management strategies. *Civil and Environmental Research* 6(4):32-40
- Ghafouri MR, Taheri Shahraiyini H, Saghafian B (2013) Modeling of continuous daily runoff of Karoon river using SMA loss function. *Iran-Water Resources Research* 9(2):73-77 (In Persian)
- Anderson M, Chen ZQ, Kavvas M, Feldman A (2000) Coupling HEC-HMS with atmospheric models for the prediction of watershed runoff. *Building Partnerships*, pp. 1-10
- Arabkhdri M, Lai F, Noor-Akma I, Mohamad-Roslan M (2010) An application of adaptive cluster sampling for estimating total suspended sediment load. *Hydrology Research* 41(1):63-73
- Arias-Hidalgo M, Bhattacharya B, Mynett A, van Griensven A (2012) Experiences in using the TRMM data to complement rain gauge data in the Ecuadorian coastal foothills. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9(11):12435-12461
- Babatolu JS, Akinnubi RT, Folagimi AT, Bukola OO (2014) Variability and trends of daily heavy rainfall events over Niger River Basin development authority area in Nigeria. *American Journal of Climate Change* 3(01):1

پی‌نوشت‌ها

- 1- Tropical Rainfall Measuring Mission
- 2- Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using ANN
- 3- Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multi-Sensor Precipitation Analysis
- 4- Post Real Time
- 5- Bias-Adjusted
- 6- Global Precipitation Climatology Center
- 7- Precipitation Radar
- 8- Calibration
- 9- Batch Process
- 10- Junction
- 11- Reach
- 12- Routing Reach
- 13- Reservoir
- 14- Source
- 15- Sink
- 16- Diversion

- Traversing No Man's Land, Interdisciplinary Essays in Honor of Professor Madduma Bandara. University of Peradeniya, Sri Lanka:169-184
- Kalita DN (2008) A study of basin response using HEC-HMS and subzone reports of CWC, Proceedings of the 13th National Symposium on Hydrology. National Institute of Hydrology, Roorkee, New Delhi
- Kibena J, Nhapi I, Gumindoga W (2014) Assessing the relationship between water quality parameters and changes in landuse patterns in the Upper Manyame River, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 67:153-163
- Mostafazadeh R, Sheikh V (2012) Rain-gauge density assessment in Golestan province using spatial correlation technique. *Watershed Management Researches* 24-4(93):79-87
- Muzik I, Chang C (1993) A microcomputer-based geographic information system for hydrologic simulation. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 8(5):355-365
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of hydrology* 10(3):282-290
- Nayak P, Venkatesh B, Krishna B, Jain SK (2013) Rainfall-runoff modeling using conceptual, data driven, and wavelet based computing approach. *Journal of Hydrology* 493:57-67
- Florian P, Hannah L C, Dennis J P, Fredrik W, David S R, Jutta T (2015) The monetary benefit of early flood warnings in Europe. *Environmental Science & Policy* 51:278-291
- Senay G, Verdin J (2004) Developing index maps of water-harvest potential in Africa. *Applied Engineering in Agriculture* 20(6):789
- Stisen S, Jensen KH, Sandholt I, Grimes DI (2008) A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin. *Journal of Hydrology* 354(1):131-148
- Teo C K, Grimes D I (2007) Stochastic modelling of rainfall from satellite data. *Journal of hydrology* 346(1):33-50
- Yilma H, Moges SA (2007) Application of semi-distributed conceptual hydrological model for flow forecasting on upland catchments of Blue Nile River Basin, a case study of Gilgel Abbay catchment. *Catchment and Lake Research* 200
- Bates PD, De Roo A (2000) A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236(1):54-77
- Burlando P, Rosso R, Cadavid LG, Salas JD (1993) Forecasting of short-term rainfall using ARMA models. *Journal of Hydrology* 144(1-4):193-211
- Castronova AM, Goodall JL, Elag MM (2013) Models as web services using the open geospatial consortium (ogc) web processing service (wps) standard. *Environmental Modelling & Software* 41:72-83
- Castronova AM, Goodall JL, Ercan MB (2013b) Integrated modeling within a hydrologic information system: an OpenMI based approach. *Environmental Modelling & Software* 39:263-273
- Dube T, Gumindoga W, Chawira M (2014) Detection of land cover changes around Lake Mutirikwi, Zimbabwe, based on traditional remote sensing image classification techniques. *African Journal of Aquatic Science* 39(1):89-95
- Fang N, Shi Z, Li L, Guo Z, Liu Q, Ai L (2012) The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed. *Catena* 99:1-8
- Fotopoulos F, Makropoulos C, Mimikou M (2010) Flood forecasting in transboundary catchments using the Open Modeling Interface. *Environmental Modelling and Software* 25(12):1640-1649
- Gichamo TZ, Popescu I, Jonoski A, Solomatine D (2012) River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling. *Environmental Modelling and Software* 31:37-46
- Goharnejad H, Mohamadi Naser M, Zakeri Niri M (2017) The optimization of energy supply systems by sequential streamflow routing method and Invasive Weed Optimization Algorithm; case study: Karun II hydroelectric power plant. *Journal of Hydraulic Structures* 3(1):71-82, doi: 10.22055/jhs.2017.13318
- Gumindoga W, Rientjes T, Shekede MD, Rwasoka DT, Nhapi I, Haile AT (2014) Hydrological impacts of urbanization of two catchments in Harare, Zimbabwe. *Remote Sensing* 6(12):12544-12574
- Habib E, Haile AT, Sazib N, Zhang Y, Rientjes T (2014) Effect of bias correction of satellite-rainfall estimates on runoff simulations at the source of the Upper Blue Nile. *Remote Sensing* 6(7):6688-6708
- Hunukumbura P, Weerakoon S, Herath S (2008) Runoff modeling in the upper Kotmale Basin. In: Hennayake N, Rekha N, Nawfhal M, Alagan R, Daskon C (Eds.),