



پیش‌بینی سیل با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای و مدل بارش-رواناب در مناطق فاقد آمار

الهه مرادیانی^۱، علی اکبر اختری^۲، آرش آذری^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۰۶

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

چکیده

از مهمترین مسائلی که در مطالعات هیدرولوژی و سیل‌خیزی به آن پرداخته می‌شود، برآورد دبی حداکثر سیلاب و تهیه هیدروگراف آن با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد. امروزه محصولات بارش ماهواره با قدرت تفکیک مکانی و زمانی متفاوت تا حدود زیادی مشکلات و محدودیت‌های رایج در تهیه داده‌های بارش را برطرف کرده‌اند. لذا هدف از این تحقیق بررسی و کاربرد داده‌های بارش ماهواره TRMM به عنوان ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی سیل در حوضه آبریز قره‌سو می‌باشد. بدین منظور ابتدا مدل مفهومی حوضه در محیط نرم‌افزار HEC-GeoHMS تهیه شده و عملکرد نرم‌افزار HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تخمین میزان بارش در قسمت‌هایی از حوضه که فاقد ایستگاه باران‌سنجی بود، از داده‌های ماهواره TRMM استفاده شد. دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای با مقایسه با مقادیر مشاهداتی طی سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۰۳ بررسی شد. نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل HEC-HMS در برآورد دبی اوج و حجم سیلاب برای حوضه آبریز داشت به طوری که اختلاف بین دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی کمتر از ۷ درصد و اختلاف حجم سیلاب مشاهداتی و محاسباتی نیز کمتر از ۱۰ درصد بود. بررسی تصاویر ماهواره TRMM نشان داد بیشترین همبستگی، بین داده‌های ماهانه با مقادیر ضریب همبستگی ۰/۹۹-۰/۵۲ بوده و داده‌های بارش روزانه از دقت کافی برخوردار نبودند. هم‌چنین با در نظر گرفتن اثر ارتفاع محل، می‌توان از مقادیر حدی بارش به دست آمده از تصاویر ماهواره TRMM با دقت قابل قبول و میانگین خطای کمتر از ۲۰ درصد استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: برآورد بارش، سنجش از دور و GIS، ماهواره TRMM، مدل هیدرولوژیکی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، moradianielahe@gmail.com

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، akhtari@razi.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، a.azari@razi.ac.ir (نویسنده مسئول)



مقدمه

اهمیت سیلاب و نقش آن در زندگی بشر باعث جلب توجه به این پدیده طبیعی شده است. مدل سازی بارش-رواناب یکی از موارد کلیدی در علوم هیدرولوژی و مدیریت محیط زیست برای دستیابی به خصوصیات سیلاب از قبیل میزان دبی اوج، زمان رسیدن به دبی اوج و حجم سیل به شمار می رود. با توجه به روش های نوین در مدل سازی و نرم افزارهای موجود که باعث افزایش سرعت و کاهش زمان اجرای محاسبات گردیده، مطالعات مربوط به هیدرولوژی بعد از دهه ۱۹۵۰ به طور چشم گیری گسترش یافت. یکی از نرم افزارهای موجود جهت شبیه سازی بارش-رواناب مدل توزیعی HEC-HMS می باشد. این مدل با داشتن تنوع زیرمدل های موجود در آن کاربرد و کارایی وسیعی در بسیاری از نقاط دنیا دارد (شکری کوچک و همکاران، ۱۳۹۱). در زمینه بررسی مدل HEC-HMS می توان به مطالعاتی مانند (Mandal et al., 2016)، (Strapazan et al., 2017)، اشاره کرد. همتی و همکاران، ۱۳۹۶ با استفاده از مدل مادکلارک و GIS به تعیین مناطق سیل خیز پرداخته و شاخص شدت سیل در حوضه را به صورت مکانی استخراج کردند. برآورد پارامتر بارش به عنوان ورودی مهم مدل های هیدرولوژیکی همواره با محدودیت هایی همراه بوده است. از این رو در سال های اخیر با به کارگیری ماهواره ها و رادارهای هواشناسی، روش های جدید و پیشرفته مبتنی بر فن آوری سنجنش از دور در اندازه گیری مقادیر بارش و دیگر عوامل اقلیمی در دسترس متخصصان قرار گرفته است (میررحیمی و همکاران، ۱۳۸۷). مطالعات زیادی در زمینه استفاده تلفیقی از داده های ماهواره ای و مدل های هیدرولوژیکی به منظور شبیه سازی سیل انجام شده است.

collischonn et al., 2008 به مدل سازی

هیدرولوژیکی رودخانه با استفاده از داده های بارش

ماهواره TRMM پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که می توان از داده های ماهواره TRMM به عنوان منبع جایگزین مفید برای برآورد بارش استفاده کرد. Behrangi et al., 2011 در کالیفرنیا به ارزیابی هیدرولوژیکی محصولات بارش ماهواره ای در یک حوضه با وسعت متوسط پرداختند. آن ها از داده های شش سال ۲۰۰۳-۲۰۰۸ در حوضه رودخانه ایلینویز^۱ استفاده کردند. نتایج نشان داد که داده های ماهواره TRMM و PERSIANN^۲ برای شبیه سازی جریان رودخانه در مقایسه با مشاهدات زمینی عملکرد بهتری دارند. Mahmoud, 2014 به برآورد ضریب پتانسیل رواناب با ادغام سنجنش از دور و GIS پرداخت و به این نتیجه رسید که تصاویر ماهواره TRMM در تعیین ضریب رواناب برای پیش بینی تغییرات رواناب سطحی در حوضه های فاقد آمار کمک چشمگیری می کنند. Zubieta et al., 2015 به بررسی اثرات مجموعه داده های بارش ماهواره ای بر مدل سازی بارش-رواناب در حوضه آمازون غربی پرداختند که نتایج آن ها نشان دهنده قابل اعتماد بودن داده های بارش ماهواره TRMM در شبیه سازی هیدرولوژیکی مدل MGB-IPH بود. Ciabatta et al., 2016 به مدل سازی بارش-رواناب در ایتالیا با استفاده از داده های بارش ماهواره ای پرداختند. نتایج آن ها نشان داد شبیه سازی مدل MISDC با داده های ادغام شده بین داده های مشاهداتی و داده های اصلاح شده ماهواره ای در بسیاری از موارد در مقایسه با فقط استفاده از داده های مشاهده ای زمینی عملکرد بهتری دارد که این موضوع نشان دهنده قابلیت داده های بارش ماهواره ای در بهبود برآورد بارش است. Koriche et al., 2016 به استفاده از محصولات ماهواره ای برای مدل سازی هیدرولوژیکی LISFLOOD و هشدار زود هنگام سیل پرداخته و به این نتیجه رسیدند که پیش بینی سیل برای حوضه های فاقد آمار با استفاده از داده های سنجنش از دور و مدل سازی هیدرولوژیکی امکان پذیر است.

^۱. Illinois

^۲. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network

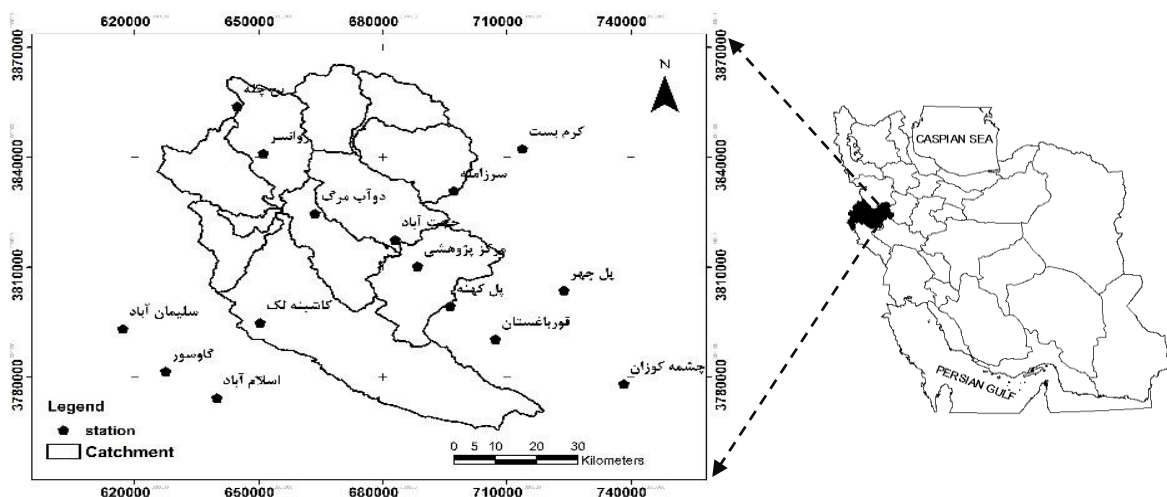
استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب و پیش‌بینی سیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا هدف از این تحقیق بررسی عملکرد مدل هیدرولوژیکی Hec-HMS برای شبیه‌سازی بارش-رواناب، برآورد بارش با استفاده از تصاویر ماهواره TRMM و ارزیابی آن با داده‌های بارش حاصل از ایستگاه‌های مشاهداتی، تخمین مناسب بارش برای منطقه مورد مطالعه و استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای به عنوان ورودی مدل هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی سیل در حوضه آبخیز قره‌سو در استان کرمانشاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز قره‌سو واقع در استان کرمانشاه در غرب ایران است که دارای وسعت ۵۷۹۳ کیلومترمربع می‌باشد که یکی از زیرحوضه‌های مهم حوضه آبخیز کرخه است. شکل (۱) حوضه آبخیز قره‌سو و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی را نشان می‌دهد. حداکثر ارتفاع این حوضه ۳۳۵۷ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۲۰۷ متر از سطح دریا می‌باشد.

Gumindoga et al., 2017 به شبیه‌سازی رواناب در ۱۰- زیرحوضه در آفریقا با استفاده از مدل Hec-HMS و داده‌های سنجهش از دور پرداختند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد می‌توان از این مدل هیدرولوژیکی با کمک داده‌های سنجهش از دور برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌های پیچیده استفاده کرد. Anjum et al., 2018 به ارزیابی محصولات بارش ماهواره TRMM در مقیاس‌های سالانه، ماهانه، فصلی و روزانه به عنوان ورودی برای مدل‌های هیدرولوژیکی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که این ماهواره مقادیر بارش متوسط تا شدید را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند. Li et al., 2017 به بررسی قابلیت استفاده از داده‌های ماهواره TRMM در مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار SWAT پرداختند. نتایج نشان داد که اختلاف میانگین بارش واقعی با بارش محاسبه شده توسط ماهواره کم و در سطح قابل قبولی است. شبیه‌سازی با مدل SWAT نشان داد که به طور کلی محصولات ماهواره TRMM به عنوان ورودی مدل عملکرد خوبی دارند. با توجه به اهمیت داده‌های بارش در پیش‌بینی سیل بخصوص در حوضه‌ها و زیرحوضه‌های فاقد آمار، بررسی قابلیت



شکل (۱): موقعیت حوضه مطالعاتی، زیرحوضه‌ها و ایستگاه‌های هواشناسی



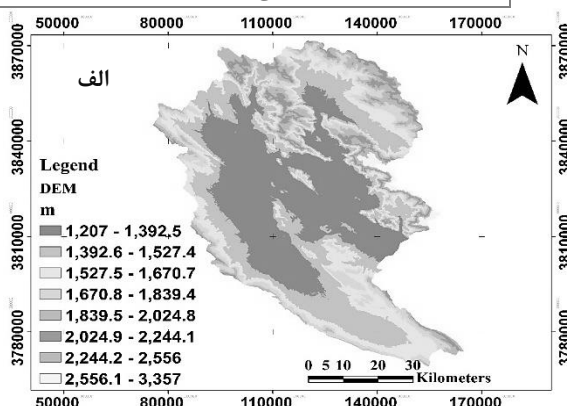
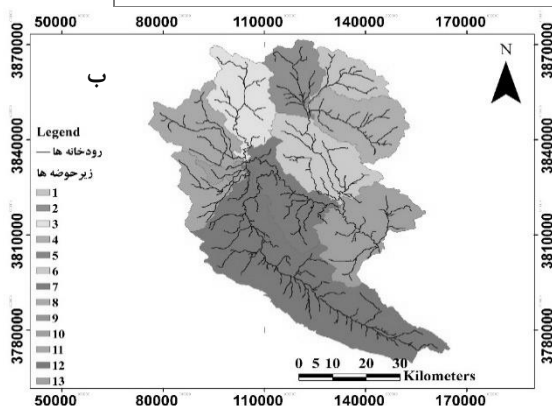
تهیه مدل بارش-رواناب

برای بررسی وضعیت هیدرولوژیکی حوضه از نظر تولید سیل، اقدام به مدل سازی بارش-رواناب در منطقه مطالعاتی گردید. برای این کار از داده های بارش مربوط به ۱۴ ایستگاه باران سنجی در محدوده مورد مطالعه استفاده گردید. طول دوره آماری با توجه به در دسترس بودن هر دو داده های بارش ماهواره ای و مشاهداتی از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ در نظر گرفته شد. همچنین از اطلاعات مربوط به هیدروگراف ساعتی سیلاب های ثبت شده در ایستگاه پل کهنه واقع در خروجی حوضه که از شرکت آب منطقه ای کرمانشاه تهیه شد، استفاده گردید. در جدول (۱) اطلاعات این ایستگاه ها آورده شده است. برای استخراج پارامترهای فیزیوگرافی موثر در سیلاب، مطابق با شکل (۲)-الف مدل رقومی ارتفاعی (DEM) حوضه مورد مطالعه تهیه شد. سپس نقشه زیرحوضه ها و رودخانه های اصلی و فرعی و اطلاعات فیزیوگرافی مورد نیاز استخراج شده و در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS مورد استفاده قرار گرفت (شکل (۲)-ب). از اطلاعات مربوط به رودخانه های اصلی

و فرعی حوضه آبریز از قبیل طول رودخانه، شیب رودخانه و سایر اطلاعات فیزیوگرافی حوضه جهت ورود به مدل هیدرولوژیکی استفاده شده است. برای به دست آوردن محدوده حوضه و تفکیک زیرحوضه ها و خصوصیات فیزیوگرافی آن ها از نرم افزار HEC-GeoHMS که با بهره گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) خصوصیات منطقه را استخراج می کند، استفاده شد. این نرم افزار یک الحاقیه برای نرم افزار HEC-HMS بوده که قادر است با توجه به شکل حوضه و رودخانه ها، شمای حوضه قابل استفاده در نرم افزار HEC-HMS را ایجاد کند. همچنین تعیین خصوصیات نظیر مساحت، شیب حوضه، طول بلندترین رودخانه، طول رودخانه از مرکز ثقل و غیره با استفاده از این نرم افزار صورت می گیرد. اولین مرحله کار در HEC-GeoHMS، پیش پردازش زمین می باشد. منظور از پیش پردازش، استخراج خصوصیات اولیه حوضه (مساحت، شیب حوضه، طول بلندترین رودخانه و طول رودخانه از مرکز ثقل حوضه تا خروجی آن) که مورد نیاز نرم افزار HEC-HMS است، می باشد.

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)
کاشبنه لک	باران‌سنجی	۱۵۰۹	۳۴/۲۸	۴۶/۶۳
پل کهنه	هیدرومتری	۱۳۱۸	۳۴/۳۱	۴۷/۱۳
گاو سور	باران‌سنجی	۱۴۰۲	۳۴/۱۶	۴۶/۳۸
اسلام آباد	باران‌سنجی	۳۳۷	۳۴/۱	۴۶/۵۱
قورباغستان	باران‌سنجی	۱۳۳۲	۳۴/۲۳	۴۷/۲۵
حجت آباد	باران‌سنجی	۱۳۱۷	۳۴/۴۸	۴۷
کرم بست	باران‌سنجی	۱۹۰۰	۳۴/۷	۴۷/۳۳
بن چله	باران‌سنجی	۱۷۰۰	۳۴/۸۱	۴۶/۵۸
چشمه کوزان	باران‌سنجی	۱۶۵۰	۳۴/۱۱	۴۷/۵۸
سرزامله	باران‌سنجی	۱۵۷۰	۳۴/۶	۴۷/۱۵
پل چهر	تبخیرسنجی	۱۳۰۶	۳۴/۳۳	۴۷/۴۳
سلیمان آباد	تبخیرسنجی	۱۴۸۰	۳۴/۲۵	۴۶/۲۵
دو آب مرگ	تبخیرسنجی	۱۳۱۰	۳۴/۵۵	۴۶/۷۸
روانسر	تبخیرسنجی	۱۳۸۸	۳۴/۷	۴۶/۶۵



شکل (۲): الف: مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و ب: نقشه

زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه‌ای

سرویس حفاظت خاک (برای محاسبه تلفات بارش استفاده شد. این روش در اصل بر کل نفوذ در طول یک رخداد بارش دلالت می‌کند. هم‌چنین به منظور تبدیل بارش به رواناب از روش هیدروگراف واحد SCS استفاده شد. در این مطالعه مقادیر CN برای هر زیرحوضه با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک منطقه که از شرکت آب منطقه‌ای استان کرمانشاه تهیه شد، استخراج گردید. به منظور واسنجی مدل هیدرولوژیکی حوضه، از هیدروگراف سیلاب رخ داده در تاریخ ۱۳۹۸/۰۳/۱۷ در ایستگاه پل کهنه (خروجی حوضه آبریز)، استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل، از وقایع سیلاب اتفاق افتاده در

مدل HEC-HMS برای تحلیل فرآیند بارش- رواناب از روش‌های متعددی از جمله روش هیدروگراف واحد، گیرش اولیه و رطوبت پیشین و همچنین جهت محاسبه تلفات از روش شماره منحنی (SCS)، روش گرین و امپت و روش شرایط اولیه و نرخ ثابت تلفات و برای روندیابی از روش‌های روندیابی ماسکینگام، روش تاخیری و روش ماسکینگام-کونج استفاده می‌کند (حسینی، ۱۳۹۲). در این مطالعه از روش شماره منحنی

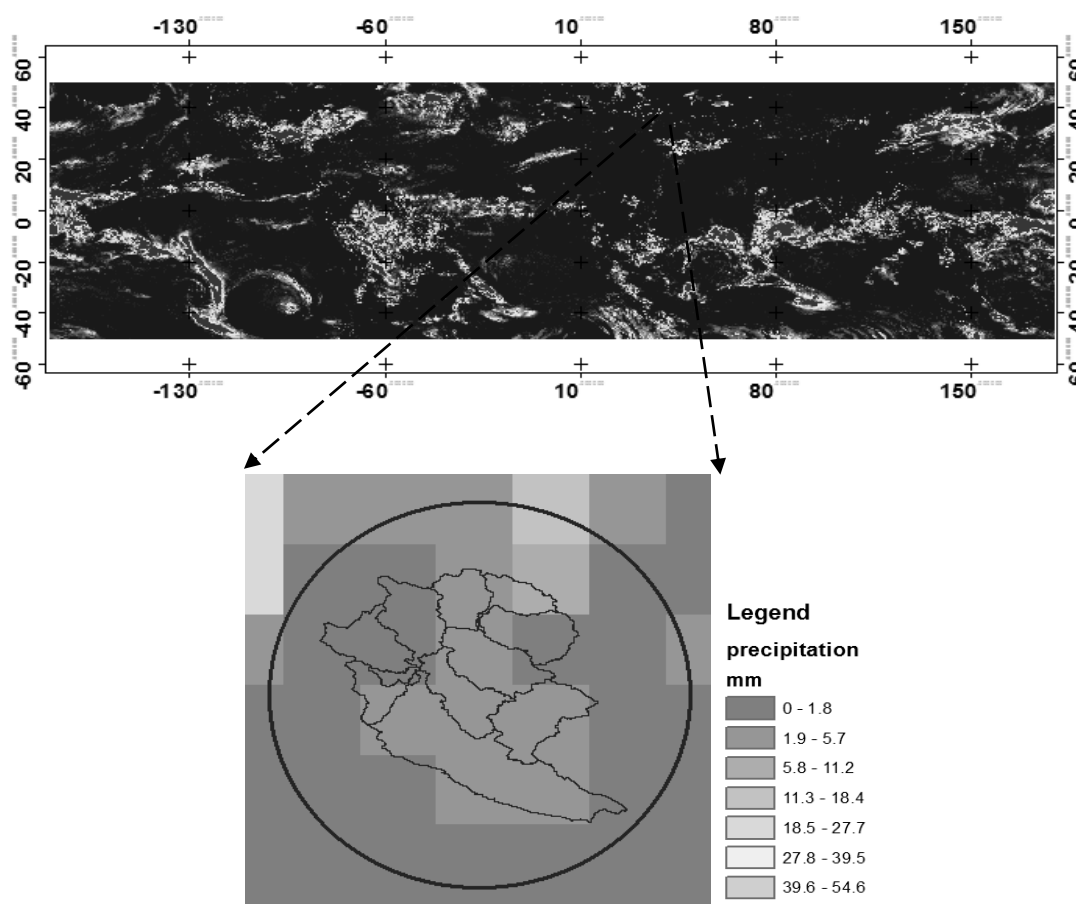
۱. SCS Curve Number



قرار می‌گیرد. برای تخمین بارش منطقه از ۱۳۲ تصویر ماهیانه و ۴۰۱۵ تصویر روزانه ماهواره TRMM مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ با فرمت NetCDF که قابلیت پردازش در نرم‌افزار GIS را دارند، استفاده شد. یکی از مهمترین ویژگی‌های سنجنده رادار بارش این ماهواره توانایی ارائه پروفیل‌های عمودی از باران و برف است. این تصاویر از <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/> تهیه و در محیط نرم‌افزار Arc GIS به نقشه‌های رستری تبدیل شدند. شکل (۳) یک نمونه از تصاویر بارش روزانه ماهواره TRMM در تاریخ ۲۰۱۱/۰۵/۱۹ را نشان می‌دهد.

تاریخ‌های ۱۹۹۸/۰۳/۲۹ و ۲۰۰۵/۰۳/۱۰ استفاده گردید. معیار انتخاب، استفاده از هیدروگرافی با بیشترین مقدار دبی اوج، کامل بودن هیدروگراف بدین منظور که دارای شاخه صعودی و شاخه نزولی باشد و اینکه هیدروگراف دارای شکل زنگوله‌ای که مناسب‌ترین نوع هیدروگراف است، بود.

استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره TRMM قدرت تفکیک مکانی این ماهواره در ثبت بارش‌ها حداقل 0.25×0.25 درجه و حداکثر 5×5 درجه می‌باشد. داده‌های ماهواره در فرمت‌های مختلف از جمله NetCDF و HDF، KMZ، TXT در اختیار کاربران



شکل (۳): تصویر بارش روزانه ماهواره TRMM و حوضه آبریز

مشاهده‌ای انجام شد. نمودار سری زمانی خواص یک سری را مشخص می‌کند و با استفاده از آن می‌توان

ابتدا با استفاده از نمودار سری‌های زمانی، تجزیه و تحلیل اولیه تغییرات هم‌زمان داده‌های ماهواره‌ای و

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X^{mean})^2} \quad (4)$$

در این رابطه‌ها n تعداد داده‌های بارش، X_i^{obs} داده‌های بارش ایستگاه زمینی و X_i^{sim} داده‌های بارش ماهواره و X^{min} ، X^{max} و X^{mean} به ترتیب حداقل، حداکثر و میانگین داده‌های ایستگاه زمینی می‌باشد. با توجه به این روابط میزان پارامترهای NRMSE و RSR هر چه به صفر و مقدار پارامتر NSE هر چه به یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر داده‌های تخمین زده شده است و پارامتر BIAS بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی داده‌های ماهواره‌ای را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت سنجی مدل هیدرولوژیکی

همانطور که گفته شد با استفاده از DEM منطقه و نرم‌افزار HEC-GeoHMS خصوصیات فیزیوگرافی حوضه که برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در نرم‌افزار HEC-HMS مورد نیاز هستند، به دست آمد. در جدول (۲) برخی از آن‌ها آورده شده است.

جدول (۲): برخی خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبریز

زیر حوضه	محیط (کیلومتر)	مساحت (کیلومتر مربع)	ارتفاع (متر)	شیب زیرحوضه (%)	شیب آبراهه (%)	زمان تمرکز (ساعت)
۱	۱۲۶/۷۶۶	۲۲۸/۴۶	۱۸۲۱/۷	۱۲	۳/۶	۹/۳۴
۲	۱۱۱/۱	۳۰/۹۶	۱۶۶۰/۳۸	۱۰/۲۱	۲/۶	۹/۵
۳	۱۶۹	۴۴۱/۵۶	۱۶۵۶/۷۵	۱۲/۱۱	۲/۵۵	۹/۵۸
۴	۱۳۱/۵۱۶	۴۳۰/۸۴	۱۶۸۹/۴	۸/۹۵	۱/۶	۱۰/۷۵
۵	۱۱/۳۳۱	۲/۹۳	۱۴۲۱	۱۳/۵۸	۱۴/۲	۱/۰۳
۶	۱۶۳/۹۱	۵۱۴/۷۸	۱۵۵۰	۱۱/۶۸	۲/۳	۸/۷۷
۷	۱۸۴/۱	۴۱۹/۲۷	۱۳۶۳/۳	۴/۵۸	۲/۲	۹/۶۶
۸	۱۵۹/۵	۳۸۴/۵۳	۱۴۹۹/۶۸	۷/۶۳	۱/۶	۹/۱۴
۹	۶/۴۱	۰/۵۴	۱۳۰۷	۱/۵۴	۰/۷	۱/۹
۱۰	۶۷/۶۴۶	۵۵/۹۷	۱۳۸۲/۱	۴/۲۸	۲/۴	۷/۹۸
۱۱	۱۴۰/۲۱۵	۲۱۹/۴۴	۱۵۱۰/۴	۵/۶۵	۱/۵	۹/۸۴
۱۲	۳۵۷/۹۲	۱۴۶۳/۶۶	۱۵۱۴	۵/۱۹	۰/۹	۲/۱۷
۱۳	۱۸۰/۱	۵۴۵/۴۱	۱۵۶۱/۷	۱۰/۷۳	۱/۲	۷/۳۲

مقادیر واقعی را با مقادیر برآورد شده مقایسه کرد. سپس از پارامتر آماری میانگین تفاوت‌ها (BIAS) به منظور مقایسه بارش ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی با داده‌های بارش حاصل از ماهواره استفاده شد که از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$BIAS = \frac{X_i^{obs}}{X_i^{sim}} \quad (1)$$

همچنین برای ارزیابی دقت برآوردها و مقایسه بهتر نتایج از پارامترهای بی‌بعد NRMSE، RSR و NASH استفاده شد. این معیارها با استفاده از روابط ۲ تا ۴ تعریف می‌شوند.

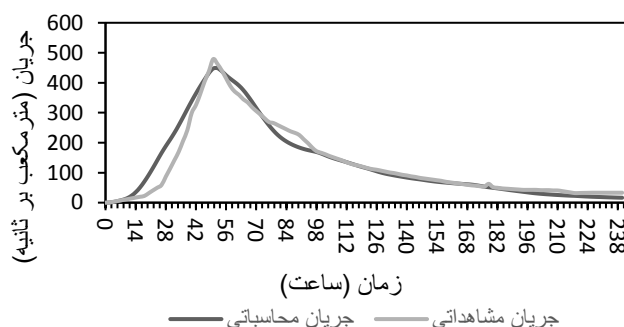
$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2 / n}}{X^{max} - X^{min}} \quad (2)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X^{mean})^2}} \quad (3)$$



دبی اوج و حجم سیلاب نیز در جدول (۳) آورده شده است.

پس از تهیه مدل حوضه و تفکیک آن به ۱۳ زیرحوضه، در محیط نرم افزار HEC-HMS هیدروگراف سیل در خروجی حوضه شبیه سازی شد (شکل ۴). نتایج مربوط



شکل (۴): هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی ایستگاه پل کهنه در تاریخ ۱۳۹۸/۰۳/۱۷

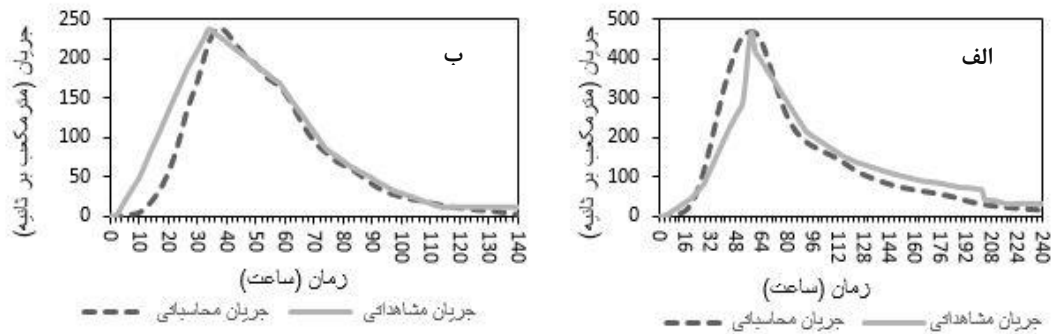
جدول (۳): مقادیر دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی و حجم سیلاب در ایستگاه پل کهنه

PSR	NSE	NRMSE	حجم سیلاب	حجم سیلاب	اختلاف دبی	دبی	دبی	تاریخ وقوع رگبار
			محاسباتی (میلیون مترمکعب)	مشاهداتی (میلیون مترمکعب)	اوج مشاهداتی و محاسباتی (%)	اوج محاسباتی (m ³ /s)	اوج مشاهداتی (m ³ /s)	
۰/۰۶	۰/۹۴	۰/۱۶	۱۱۶/۰۵	۱۱۳/۱۷	۶/۳	۴۴۸/۵	۴۷۸/۷	۱۳۹۸/۰۳/۱۷

بنابراین، این زیر حوضه‌ها در برنامه‌های مدیریتی و انجام پروژه‌های آبخیزداری و حفاظت خاک از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. در بررسی ارتباط مساحت زیر حوضه‌ها با حجم سیلاب خروجی از آن‌ها، نسبت مستقیمی وجود ندارد و لزوماً زیرحوضه‌ای که مساحت بیشتری دارد، هیدروگراف خروجی از آن سیلاب بیشتری تولید نمی‌کند. برای مثال مساحت زیرحوضه W۶ از زیرحوضه W۷ بیشتر بوده در حالی که حجم سیلاب خروجی از زیر حوضه W۶ برابر ۱۱/۷۷۵ میلیون مترمکعب و حجم سیلاب خروجی از زیرحوضه W۷ برابر ۱۴/۲۸ میلیون مترمکعب می‌باشد. برای بررسی نتایج به دست آمده از واسنجی مدل و ارزیابی آن‌ها، از رگبارهای مشاهده‌ای مورخ ۱۳۹۸/۰۳/۲۹ و ۲۰۰۵/۰۳/۱۰ استفاده شد و پارامترهای بهینه شده به مدل معرفی و مدل جهت بررسی چگونگی برازش

مقایسه نمودارهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهند، مدل مقدار دبی اوج را با دقت خوبی و با اختلاف حدود ۶/۳ درصد و مقدار حجم سیلاب (سطح زیر نمودار هیدروگراف سیل) را با اختلاف حدود ۲/۵ درصد پیش‌بینی می‌کند که عملکرد مدل از این نظر کاملاً رضایت بخش ارزیابی می‌گردد. هم‌چنین زمان وقوع پیک و زمان پایه هیدروگراف (فاصله بین زمان شروع و پایان سیل) را نیز با دقت مناسبی (اختلاف کمتر از ده درصد) پیش‌بینی می‌کند. در کالیبراسون دستی مدل، بیشترین حساسیت مدل به پارامتر شماره منحنی نفوذ (CN) مشاهده شد که مقدار آن برای هر زیر حوضه متفاوت و تاثیر آن در میزان حجم سیلاب، قابل توجه بود. با توجه به مقدار دبی پیک شبیه‌سازی شده در هر زیر حوضه، بیشترین مقدار دبی پیک به ترتیب مربوط به زیر حوضه‌های W۷ و W۱۳ می‌باشد

هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسباتی اجرا گردید (شکل ۵). نتایج مربوط به دبی اوج و حجم سیلاب این هیدروگراف‌ها نیز در جدول (۴) آورده شده است



شکل (۵) - هیدروگراف محاسباتی و مشاهده‌ای در ایستگاه پل کهنه الف: مورخ ۲۰۰۵/۰۳/۱۰ و ب: مورخ ۱۹۹۸/۰۳/۲۹

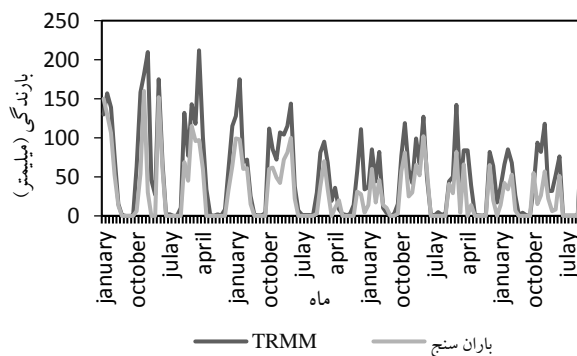
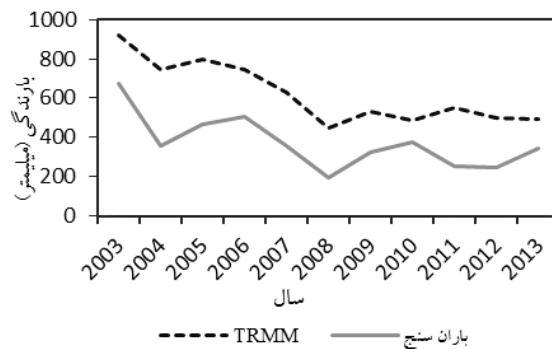
جدول (۴): مقادیر دبی اوج و حجم سیلاب مشاهده‌ای و محاسباتی

PSR	NSE	NRMSE	حجم سیلاب	حجم سیلاب	اختلاف دبی اوج	دبی اوج	دبی اوج	تاریخ وقوع
			محاسباتی (میلیون مترمکعب)	مشاهداتی (میلیون مترمکعب)	مشاهداتی و محاسباتی (درصد)	محاسباتی (m^3/s)	مشاهداتی (m^3/s)	رگبار
۰/۱۱	۰/۸۹	۰/۲۱	۳۹/۰۳	۴۵/۶۶	۰/۲۹	۲۳۷/۷	۲۳۷	۱۹۹۸/۰۳/۲۹
۰/۲	۰/۸۰	۰/۲۸	۱۱۸/۶۷	۱۱۹/۶۸	۰/۶۸	۴۷۰/۲	۴۶۷	۲۰۰۵/۰۳/۱۰

تجزیه و تحلیل مجموعه‌ای از داده‌ها که در گذر زمان ثبت شده‌اند، رسم نمودار سری‌های زمانی مربوط می‌باشد. این نمودارها خواص یک سری را آشکار و مقایسه مقادیر واقعی و تخمین‌زده شده را امکان‌پذیر می‌کند. در این تحقیق از نمودار سری‌های زمانی داده‌های مشاهده شده و داده‌های حاصل از ماهواره TRMM در ۱۴ ایستگاه، برای بررسی اولیه چگونگی تغییرات هم‌زمان این داده‌ها استفاده شد. که به عنوان نمونه نمودارهای سری زمانی بارندگی سالانه و ماهانه در ایستگاه چشمه کوزان آورده شده است (شکل ۶).

تحلیل تصاویر ماهواره TRMM

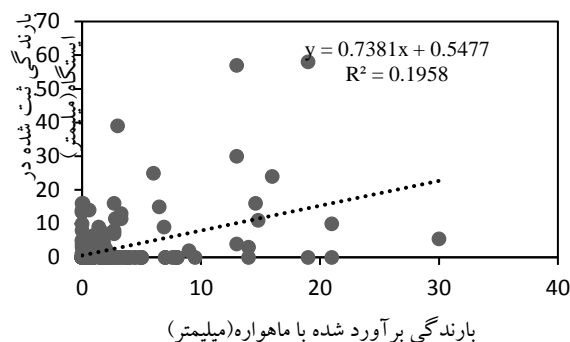
ماهواره TRMM در تاریخ ۲۸ نوامبر ۱۹۹۷ با همکاری سازمان فضایی ژاپن و ایالات متحده به فضا پرتاب شد و در مدار قرار گرفت و از ۳۱ ژانویه سال ۲۰۰۰ توزیع داده‌ها به صورت تقریباً هم‌زمان آغاز گردید. در این مطالعه، محدوده حوضه با ۲۰ پیکسل ماهواره TRMM پوشش داده می‌شود. به منظور بررسی بهتر از ایستگاه‌های خارج حوضه نیز که اطلاعات آن‌ها در دسترس بود استفاده شد. نخستین مرحله در



شکل (۶): سری زمانی داده‌های ماهانه و سالانه بارش ماهواره‌ای و مشاهداتی ایستگاه چشمه کوزان ۲۰۱۳-۲۰۰۳

در مقیاس ماهانه در محدوده ۰/۵۲-۰/۹۹ بود که نشان‌دهنده هم‌بستگی نزدیک داده‌های بارش ماهواره با داده‌های مشاهداتی بود. با این حال مقایسه داده‌های بارش روزانه نشان دهنده دقت پایین این داده‌ها در منطقه مورد مطالعه بود. نمودار هم‌بستگی بین داده‌های بارش روزانه مشاهداتی و ماهواره‌ای ایستگاه بن‌چله در سال ۲۰۱۳ در شکل (۷) آورده شده است. بررسی مقادیر $Bias$ ، $NRMSE$ و میانگین بارندگی مشاهداتی نیز نشان داد که داده‌های ماهواره‌ای در مقیاس ماهانه بیشترین دقت را داشته‌اند هم‌چنین پارامتر $Bias$ نشان داد که ماهواره در بیشتر موارد بیش‌برآوردی داشته است. مقادیر بیشتر از یک نشان دهنده بیش‌برآوردی و مقادیر کمتر از یک نشان‌دهنده کم‌برآوردی داده‌های ماهواره‌ای است. مقادیر این پارامترها به عنوان نمونه در سال ۲۰۱۰ در جدول (۵) آمده است.

با توجه به روند تغییرات بارش در مقیاس سالانه و ماهانه مشاهده می‌شود که نوسان‌های سالانه و ماهانه بارش ایستگاهی و ماهواره‌ای دارای روند مشابه می‌باشند. با توجه به شکل‌های بالا می‌توان گفت که رفتار هر دو سری زمانی در مقیاس‌های سالانه و ماهانه بسیار نزدیک می‌باشند و با افزایش (کاهش) بارش ایستگاهی، بارش ماهواره‌ای نیز افزایش (کاهش) می‌یابد. به منظور ارزیابی میزان دقت داده‌های بارش ماهواره TRMM برای محدوده مورد مطالعه، داده‌های برآورد شده بارش از ماهواره با داده‌های ۱۴ ایستگاه زمینی در داخل و نزدیک محدوده مطالعاتی مورد بررسی قرار داده شد. مقادیر ضریب هم‌بستگی در مقیاس سالانه در محدوده ۰/۲۴-۰/۸۸ که کمترین مقدار مربوط به ایستگاه پل‌چهر در سال ۲۰۰۹ بود و



شکل (۷): نمودار همبستگی بین داده‌های بارش روزانه مشاهداتی و ماهواره‌ای ایستگاه بن چله در سال ۲۰۱۳

جدول (۵): مقادیر پارامترهای آماری مورد استفاده برای بررسی دقت داده‌های ماهانه بارش ماهواره TRMM در سال ۲۰۱۰

نام ایستگاه	Mean	RMSE	Bias	NRMSE
کاشبنه لک	47.56	19.34	0.939	0.27
پل کهنه	28.26	23	1.5	0.59
گاسور	40.4	12.8	1.02	0.2
اسلام آباد	32.33	27	1.02	0.6
قورباغستان	31.08	16.3	1.2	0.37
حجت آباد	30.62	19.7	1.4	0.45
کرم بست	27.58	18	1.4	0.45
بن چله	47.37	18.2	1.2	0.26
چشمه کوزان	31.41	15	1.29	0.33
سرزامله	37.37	13.3	1.1	0.24
پل چهر	29.56	24.7	1.5	0.63
سلیمان آباد	46.83	17.35	0.93	0.26
دوآب مرگ	32.33	17	1.3	0.34
روانسر	39.54	13.5	1.1	0.22

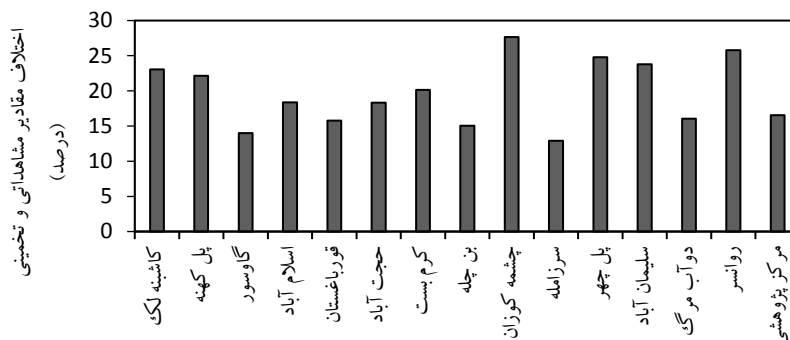
بررسی مقادیر حدی بارش

در این مرحله به بررسی و مقایسه مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته در طول دوره آماری پرداخته شد. بدین منظور مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته برای هر ایستگاه از هر دو منبع داده‌ی باران سنج‌های زمینی و محصولات بارش ماهواره TRMM استخراج گردید. سپس اثر ارتفاع بر بارش پیش‌بینی شده توسط ماهواره بررسی شد. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از برقراری رابطه‌ای بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های ماهواره و

ارتفاع محل، اختلاف میان مقادیر واقعی و ماهواره‌ای را کاهش داد. بنابراین برای هر سال رابطه‌ای به دست آمد که در جدول (۶) آورده شده‌اند. مقادیر اختلاف بین حداکثر بارش ۲۴ ساعته به دست آمده از روابط با مقدار واقعی نیز در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های تخمین زده شده با استفاده از روابط ارائه شده در بیشتر ایستگاه‌ها کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد

جدول (۶): روابط به دست آمده برای تخمین حداکثر بارش ۲۴ ساعته با در نظر گرفتن اثر ارتفاع محل

سال	رابطه پیشنهادی
2003	$P = -0.07 \times TRMM + 0.021 \times H + 14.933$
2004	$P = 0.303 \times TRMM + 0.077 \times H - 89.608$
2005	$P = -0.397 \times TRMM + 0.018 \times H + 56.146$
2006	$P = 0.516 \times TRMM + 0.011 \times H - 4.373$
2007	$P = -0.378 \times TRMM + 0.019 \times H + 19.653$
2008	$P = 1.012 \times TRMM - 0.012 \times H + 15.836$
2009	$P = -0.069 \times TRMM + 0.002 \times H + 45.43$
2010	$P = -0.214 \times TRMM + 0.01 \times H + 34.277$
2011	$P = 0.528 \times TRMM + 0.017 \times H + 7.581$
2012	$P = 0.303 \times TRMM + 0.004 \times H + 16.662$
2013	$P = 0.179 \times TRMM + 0.018 \times H + 3.208$

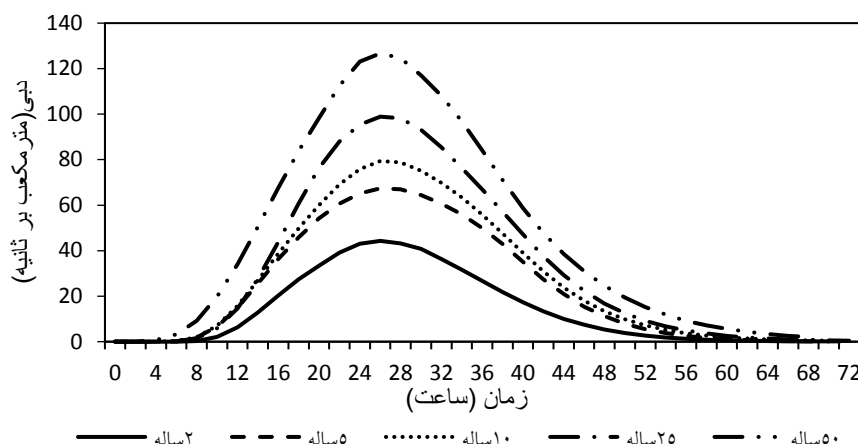


شکل (۸): مقادیر اختلاف حداکثر بارش ۲۴ ساعته به دست آمده از روابط با مقادیر داده‌های مشاهداتی

حداکثر بارش با دوره برگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال به دست آمد. در ادامه با تعیین سهم هر زیرحوضه از بارش‌های حاصل از ایستگاه‌های باران‌سنجی و پیکسل‌های ماهواره، و با استفاده از مدل HEC-HMS، هیدروگراف‌های سیل با دوره برگشت‌های مختلف استخراج شد (شکل ۹). مقادیر دبی اوج نیز در جدول (۷) آورده شده است.

محاسبه سیلاب با دوره برگشت‌های مختلف

با استفاده از روابط به دست آمده می‌توان مقادیر بارش حداکثر ۲۴ ساعته را برای قسمت‌هایی از حوضه که فاقد ایستگاه باران‌سنجی هستند، به دست آورد. پس از تعیین مقادیر بارش در پیکسل‌های فاقد ایستگاه باران‌سنجی، با استفاده از نرم‌افزار SMADA و تابع توزیع مناسب که تابع لوگ پیرسون تیپ سه بود، مقادیر



شکل (۹): هیدروگراف‌های سیلاب حاصل از مقادیر بارش پیش‌بینی شده به ازای دوره برگشت‌های مختلف

جدول (۷): مقادیر دبی پیک سیلاب (مترمکعب بر ثانیه) با دوره برگشت‌های مختلف

دبی پیک ۲ ساله	دبی پیک ۵ ساله	دبی پیک ۱۰ ساله	دبی پیک ۲۵ ساله	دبی پیک ۵۰ ساله
۴۴/۳	۶۷/۴	۷۹/۴	۹۸/۹	۱۲۶/۷

نتیجه‌گیری

تلفیق کاربردی تکنیک‌های سنجش از دور و GIS و استفاده از قابلیت مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند در شبیه‌سازی دقیق‌تر بارش-رواناب در حوضه‌هایی که با مشکل داده‌های بارش مواجه هستند، راهگشا باشد. نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل نشان داد که مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS از دقت مناسبی برای شبیه‌سازی دبی اوج و هیدروگراف سیل در این منطقه، برخوردار است و به خوبی توانسته خصوصیات فیزیکی و پوشش سطح حوضه و ویژگی‌های بارندگی از قبیل شدت، مدت و یکنواختی آن را شبیه‌سازی کند، بنابراین می‌تواند در حوضه‌هایی که ویژگی‌های اقلیمی و فیزیوگرافی نزدیک به حوضه آبریز قره‌سو را دارند، مورد استفاده قرار گیرد. شکری کوچک و همکاران نیز در تحقیقی که با هدف تخمین آبنمود سیلاب حوضه آبخیز ایدنک با استفاده از مدل HEC-HMS و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که کارایی مدل در برآورد رواناب و دبی اوج سیلاب عملکرد رضایت‌بخشی دارد. با این حال عملکرد مدل به

خصوصیات فیزیکی و شرایط فیزیوگرافی حوضه وابسته است و قبل از استفاده برای هر حوضه، کارایی مدل باید مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به این که پارامتر بارش یکی از ورودی‌های مهم مدل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد، در این تحقیق سعی بر آن شد که با استفاده از داده‌های بارش ماهواره TRMM، قابلیت جایگزینی این منبع اطلاعاتی برای حوضه مورد مطالعه بررسی شود. نتایج مقایسه محصولات بارش ماهواره‌ای با داده‌های مشاهداتی ثبت شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی نشان داد که بیشترین همبستگی بین داده‌های ماهانه برقرار است به طوری که مقدار R در محدوده ۰/۵۲ تا ۰/۹۹ قرار دارد که این همبستگی بالا در همه سال‌های تر، نرمال و خشک مشاهده شد. بنابراین در این مقیاس، استفاده از تصاویر ماهواره TRMM در مدل‌های برنامه ریزی منابع آب و مطالعات بیلان که بارش ماهانه به عنوان پارامتر ورودی مهم در آن محسوب می‌شود (مانند مدل WEAP)، مناسب می‌باشد. همچنین نتایج تحقیق (مددی و همکاران، ۱۳۹۴) در ارزیابی قابلیت داده‌های ماهواره

فیزیوگرافی نزدیک به حوضه آبریز قره‌سو را دارند، مورد استفاده قرار گیرد. شکری کوچک و همکاران نیز در تحقیقی که با هدف تخمین آبنمود سیلاب حوضه آبخیز ایدنک با استفاده از مدل HEC-HMS و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که کارایی مدل در برآورد رواناب و دبی اوج سیلاب عملکرد رضایت‌بخشی دارد. با این حال عملکرد مدل به

و به صورت تلفیقی با داده‌های باران‌سنج‌ها، هیدروگراف سیل با دوره برگشت‌های مختلف که ملاک طراحی بسیاری از سازه‌های آبی می‌باشد را با دقت بیشتری محاسبه کرد. به طور کلی می‌توان گفت که استفاده از محصولات ماهواره TRMM در مناطقی که امکان قرار دادن باران‌سنج مشکل و پرهزینه می‌باشد، در مقیاس‌های ماهیانه و برای استخراج مقادیر حدی توصیه می‌گردد. اما همواره لازم است ابتدا داده‌های ماهواره‌ای در هر مکان، ارزیابی دقیق شوند زیرا عملکرد داده‌های ماهواره‌ای بارش در تخمین بارش، بستگی به رژیم بارش، ارتفاع و منطقه مورد بررسی دارد.

TRMM در برآورد بارش در حوضه مرزی غرب ایران نشان داد که این ماهواره در مقیاس سالانه و ماهانه داده‌های مناسبی با همبستگی معنی‌داری در سطح ۵ درصد ارائه می‌کند. برای مقایسه مقادیر حدی بارش، از مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته استفاده شد. روابط به دست‌آمده نشان داد که پارامتر ارتفاع تأثیر به‌سزایی در کاهش اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر به دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای دارد به طوری که مقدار اختلاف‌ها در بیشتر موارد کمتر از ۲۰ درصد محاسبه شد. بنابراین می‌توان با استفاده از این روابط، مقدار حداکثر بارش ۲۴ ساعته را برای نقاط فاقد ایستگاه باران‌سنجی محاسبه

منابع

حسینی، م.، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه آبخیز قره‌سو استان کرمانشاه با استفاده از مدل SWAT، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۶، شماره ۱، ص ۶۳-۷۳.

شکری کوچک، س.، بهنیا، ع. ا.، رادمنش، ف. و آخوند علی، ع. م.، ۱۳۹۱. تخمین آنمود سیلاب حوضه آبخیز با استفاده از مدل HEC-HMS و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه ایدنک)، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال سوم، شماره ۵، ص ۶۳-۸۸.

میررحیمی، س. م. و فیضی‌زاده، ب.، ۱۳۸۷. بررسی دقت داده‌های رادار زمینی و TRMM در برآورد بارش، همایش ژئوماتیک.

همتی، م.، شهنازی، م.، احمدی، ح. و سالارگری، م.، ۱۳۹۶. تعیین مناطق سیل خیز حوضه آبریز قرنقو با استفاده از مدل هیدرولوژیکی مادکلارک و GIS، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، شماره ۴، ص ۸۰-۶۵.

مددی، غ.، حمزه، س. و نوروزی، ع. ا.، ۱۳۹۴. ارزیابی بارش در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و سالانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: حوضه مرزی غرب ایران)، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال ششم، شماره دوم.

Anjum, M., Ding, Y., Shangguan, D., Ahmad, I., Ijaz, M., Farid, H., Yghob, Y., Zaman, M. and Adnan, M., 2018. Performance evaluation of latest integrated multi-satellite retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) over the northern highlands of Pakistan. *Atmospheric Research*, p.134-146.

Behrangi, A., Khakbaz, B., Chun Jaw, T., AghaKouchak, A., Hsu, K. and Sorooshian, S., 2011. Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin. *Journal of Hydrology*, v. 397, p. 225-237.

Ciabatta, L., Brocca, L., Massari, C., Moramarco, T., Gabellani, S., Puca, S. and Wagner, W., 2016. Rainfall-runoff modelling by using SM2RAIN-derived and state-of-the-art satellite



Collischonn, B., Collischonn, W. and Tucci, C. E. M., 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, v. 360, p. 207–216.

Gumindoga, W., Rwasoka, D., Nhapi, I. and Dube, T., 2017. Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model. *Physics and Chemistry of the Earth*, p.371-382.

Koriche, S. and Rientjes T. H. M., 2016. Application of satellite products and hydrological modelling for flood early warning. *Physics and Chemistry of the Earth*, p.12-23.

Li, D., Christakos, G., Ding, X. and Wu, J., 2017. Adequacy of TRMM satellite rainfall data in driving the SWAT modelling of Tiaoxi catchment (Taihu lake basin, China). *Journal of Hydrology*, p. 322-331.

Mahmoud, S., 2014. Investigation of rainfall–runoff modeling for Egypt by using remote sensing and GIS integration. *Catena*, v. 120, p. 111–121.

Mandal, S. P. and Chakrabarty, A., 2016. Flash flood risk assessment for upper Teesta river basin: using the hydrological modeling system (HEC-HMS) software. *Model. Earth Syst. Environ*, P. 2-59.

Strapazan, C. and Petrut, M., 2017. Application of ARCHydro and HEC-HMS model techniques for Runoff simulation in the headwater areas of COVASNA watershed (Romania). *Geographia Technica*, p. 95-107.

Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C. and Lavado, W., 2015. Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall–runoff modeling of the Western Amazon basin of Peru and Ecuador. *Journal of Hydrology*, v. 528, p. 599–612.



Flood Forecasting Using Satellite Images and Rainfall-Runoff Model in No Data Areas

Elahe Moradiani¹, Ali-Akbar Akhtari², Arash Azari³

Abstract

One of the most important issues discussed in hydrology and flood analysis are flood discharge estimation and the development of its hydrograph, using hydrological models. Today, satellite precipitation products with different spatial and temporal resolutions, have overcome the common problems and constraints in supplying rainfall data. Therefore, the aim of this study is the investigation and application of the TRMM satellite rainfall data as the input for hydrological models used for flood simulation in Gharehsoo watershed. For this purpose, first, the conceptual model of the basin was developed in the HEC-GeoHMS software and the performance of the HEC-HMS software was evaluated in flood hydrograph simulation. The TRMM satellite data was used to estimate the rainfall in parts of the basin lacking a rain gauge station. The accuracy of satellite precipitation data was compared with observation values over the years 2013-2003. The results showed that the HEC-HMS model was suitable for estimating the peak discharge and flood volume for the catchment area, so that the difference between the observational and computational peak discharge was less than 7%, and the difference between the observational and computational flood volume was less than 10%. The examination of TRMM satellite images showed that the highest correlation was observed amongst the monthly data, with correlation coefficient values of 0.25-0.99 and the daily rainfall data was not sufficiently accurate. Also, taking into account the effect of the height of the site, the precipitation values obtained from the TRMM satellite images can be used with acceptable accuracy and an average error of less than 20%.

Keywords: Precipitation Estimation, Remote Sensing and GIS, TRMM Satellite, Hydrological Model

¹MSE student of water resource management, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, moradianielahe@gmail.com

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, akhtari@razi.ac.ir

³Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, a.azari@razi.ac.ir (corresponding author)