

برآورد سیلاب با دوره بازگشت مختلف در حوضه آبخیز بابلرود با استفاده از مدل WMS

- ❖ **تکتم ایمانی؛** دانش آموخته گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ❖ **مهدی دلغندی*؛** استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ❖ **صمد امامقلی زاده؛** دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ❖ **زهرا گنجی نوروژی؛** استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

چکیده

ارزیابی مخاطرات سیلاب موضوع مهمی است که می‌تواند منجر به کاهش خسارات سیل گردد. مدل‌سازی بارش- رواناب نقش کلیدی در مدیریت منابع آب و همچنین جلوگیری از مخاطرات سیل ایفا می‌کند. اما استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی به‌منظور شبیه‌سازی رواناب نیازمند واسنجی پارامترهای مختلف هست. از این‌رو، در مطالعه حاضر مدل WMS11.0 جهت شبیه‌سازی دبی اوج و حجم سیلاب‌های حوضه بابل رود مورد ارزیابی قرار گرفت. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل به ترتیب از ۳ و ۲ رویداد بارش استفاده شد. سپس باران طرح منطقه مورد مطالعه، با دوره بازگشت‌های مختلف (۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ساله) تعیین و سیلاب ناشی از این بارش‌ها شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که مدل WMS می‌تواند با دقت خوبی دبی اوج (با خطای حدود ۵ درصد) و حجم سیلاب (با خطای کمتر از ۲۶ درصد) را برآورد کند. اما مدل قادر نبود شکل هیدروگراف را با دقت خیلی خوبی شبیه‌سازی نماید. نتایج نشان داد که دبی اوج و حجم سیلاب ناشی از بارش‌های طرح ۲ تا ۵۰۰ ساله، به ترتیب بین ۵۰ تا ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه و ۶/۶ تا ۳۲/۴ میلیون مترمکعب متغیر می‌باشد.

واژگان کلیدی: بارش- رواناب، بارش طرح، دبی اوج، مدل‌سازی، هیدروگراف سیلاب.

۱. مقدمه

هرساله وقوع سیلاب خسارات مالی و جانی زیادی را به ساکنین مناطق سیل خیز وارد می‌کند [۱۳]. این خسارات تنها مربوط به مناطق مرطوب نمی‌شود بلکه مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز تحت تأثیر سیلاب‌های ناگهانی قرار می‌گیرند [۱۸]. به‌عنوان نمونه سیلاب سال ۲۰۰۹ جده عربستان سعودی، تلفات جانی و مالی زیادی را به بار آورد [۱۴]. این در حالی است که با شکل‌گیری پدیده تغییر اقلیم، انتظار می‌رود وقوع رویدادهای حدی مانند سیلاب افزایش یابد [۱۲].

ارزیابی مخاطرات سیلاب یکی از موضوعات مهم می‌باشد که می‌تواند ریسک‌های مربوط به سیلاب را کاهش داده و توسعه پایدار را به همراه داشته باشد [۱۸]. سیستم‌های هشدار سیل نیز می‌توانند با هشدار به‌موقع، خسارات ناشی از سیلاب را کاهش دهند. در هر دو مورد نیاز است پیش‌بینی درستی از وقوع سیلاب صورت گیرد [۱۳]. علاوه بر این، سازه‌های آبی نیز بر اساس دبی طرح با دور بازگشت‌های مختلف طراحی می‌شوند لذا برآورد خصوصیات سیلاب برای جلوگیری از خسارات سیلاب و همچنین مدیریت منابع آب حیاتی می‌باشد [۲۵].

مدل‌سازی هیدرولوژیکی می‌تواند کمک شایانی برای رسیدن به این اهداف نماید. در حال حاضر، با پیشرفت علم کامپیوتر، مدل‌های هیدرولوژیکی می‌توانند با بهره‌گیری از اطلاعات لازم، مدل‌های بارش-رواناب و معادلات حاکم بر جریان آب را حل نمایند [۱۴] و پاسخ حوضه آبریز به فرآیندهای اقلیمی و هواشناسی را بررسی نمایند. با این وجود، این مدل‌ها برای تبدیل بارش به رواناب و همچنین روندیابی رواناب، نیازمند برآورد تعدادی پارامتر می‌باشند. برآورد این پارامترها که به‌منظور نزدیکی خروجی مدل به مقادیر مشاهداتی صورت می‌پذیرد ارزیابی مدل (واسنجی و اعتبارسنجی) نام دارد [۱۷]. برخی از مدل‌ها برای ارزیابی مدل، از متغیرهایی مانند نقشه خاک و گیاه استفاده می‌کنند. اما ارزیابی مدل با داده‌های بارش و دبی، کارایی مدل‌ها را افزایش می‌دهد [۱۳].

پارامترهای ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی به ندرت قابل‌اعتماد هستند ناگفته پیداست که عدم قطعیت زیادی در داده‌های هواشناسی، داده‌های ایستگاه هیدرومتری، ساختار و پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی در پیش‌بینی‌های مدل‌های هیدرولوژیکی وجود دارد [۱۱]، که در مطالعات زیادی به این عدم قطعیت‌ها پرداخته شده است [۱، ۱۶، ۲۴]. اما از بین همه داده‌های مورد نیاز، مهم‌ترین چالش در استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی کمبود داده‌های گذشته بارش-رواناب می‌باشد [۲۵].

کلیه مطالب ذکرشده نشان از اهمیت بالای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی برای استفاده از آن‌ها در پیش‌بینی و مدیریت سیلاب دارد. از این رو در مطالعات متعددی به ارزیابی و کاربرد مدل‌های بارش-رواناب در برآورد سیلاب پرداخته شده است، از جمله ارون و همکاران با استفاده از مدل بارش-رواناب SWMM سیلاب شهری را برای دور بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ سال برای نیشابور شبیه‌سازی نمودند [۵]. قبادیان و همکاران به پیش‌بینی سیلاب حاصل از بارش حوضه آبخیز قره‌سو با استفاده از نرم‌افزار WMS و مدل HEC-HMS پرداختند. در این پژوهش برای ارزیابی مدل، از سه رویداد بارش-رواناب (۲ رویداد برای واسنجی و یک رویداد برای اعتبارسنجی) استفاده شد [۸]. گودرزی و همکاران در ارزیابی عملکرد مدل IHACRES به این نتیجه رسیدند که این مدل در شبیه‌سازی جریان‌های روزانه و ماهانه برخلاف جریان سالانه دقت قابل قبولی دارد [۹]. نوری و همکاران با ارزیابی مدل WMS/HEC-HMS عنوان نمودند مدل WMS ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز می‌باشد [۱۹]. گامیندوگا و همکاران، با استفاده از مدل HEC-HMS جهت شبیه‌سازی رواناب در ۱۰ زیر حوضه در آفریقا نتیجه گرفتند که این مدل هیدرولوژیکی با کمک داده‌های سنجش از دور در حوضه‌های پیچیده برای شبیه‌سازی رواناب کارایی مناسبی دارد [۱۰]. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از چند رویداد بارش، مدل بارش-رواناب HEC-HMS ارزیابی و

۲. روش شناسی

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز بابلرود از دامنه‌های شمالی کوه‌های البرز سرچشمه گرفته و از میان شهر بابل می‌گذرد. در این تحقیق یکی از زیرحوضه‌های بابلرود (اراضی بالاتر از ایستگاه هیدرومتری قران تالار) مورد مطالعه قرار گرفت. مساحت این زیر حوضه $401/5$ کیلومتر مربع است. ایستگاه هیدرومتری قران تالار با ارتفاع 115 متری از سطح دریا با طول جغرافیایی $52^{\circ}46'$ و عرض جغرافیایی $36^{\circ}18'$ در خروجی منطقه مورد مطالعه قرار دارد. حوضه مورد مطالعه بین دو طول جغرافیایی $52^{\circ}38'$ و $52^{\circ}55'$ و عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ}02'$ و $36^{\circ}19'$ قرار دارد. بر اساس روش دمارتن، منطقه مورد مطالعه دارای آب‌وهوای مرطوب می‌باشد. موقعیت حوضه آبخیز رودخانه بابلرود در کشور و زیرحوضه مورد مطالعه، در شکل (۱) ارائه شده است. متوسط بارش سالانه منطقه در طول دوره آماری 30 ساله حدود 950 میلی‌متر می‌باشد. در این تحقیق، از آمار ایستگاه هیدرومتری قران-تالار برای داده‌های رواناب و از آمار ایستگاه هواشناسی فیروزجاه برای داده‌های بارش استفاده شد.

۲.۲. مدل WMS و داده‌های مورد نیاز

سیستم مدل‌سازی حوضه آبخیز^۱ (WMS) از مدل‌های جدید در زمینه مدیریت جامع حوضه آبخیز محسوب می‌شود که با همکاری دانشگاه برینگهام و گروه هیدرولوژی مهندسی ارتش آمریکا در سال 2004 طراحی شده است. مدل WMS از زیر مدل‌های مختلفی تشکیل شده که می‌توانند رواناب سطحی و هیدروگراف را تخمین بزنند [۲۳] و برای این منظور حداقل به داده‌های ساعتی بارش، هیدروگراف رواناب متناظر با هر بارش، نقشه‌های DEM منطقه، خاک و کاربری اراضی نیاز دارد. برای شبیه‌سازی بارش-رواناب لازم است ابتدا DEM حوضه وارد مدل گردد و در مازول Drainage شبکه

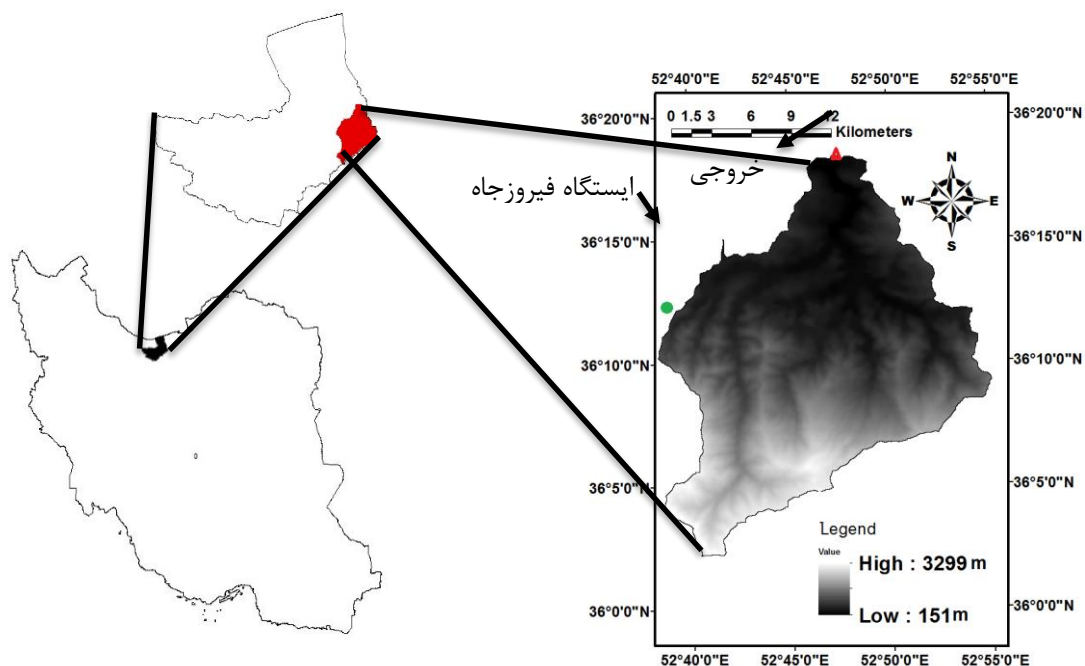
بیان شد که پارامترهای واسنجی به نحوه زیرحوضه بندی حساس هستند [۲۶]. نیازی و همکاران با استفاده از مدل WMS و GIS رواناب ناشی از بارش با دور بازگشت‌های 5 تا 100 سال را برآورد نمودند [۱۸]. از مدل‌های بارش رواناب برای تخمین دبی اوج سیلاب در شرایط تغییر اقلیم نیز استفاده شده است [۲۲]. در تحقیقی دیگر روی برآورد پارامترهای اولیه مدل HEC-HMS مطالعه شده است و یک روش جامع برای این منظور پیشنهاد گردیده است [۲]. از مدل WMS برای تخصیص بهینه آب یکی از حوضه‌های هند نیز استفاده شده است [۲۳].

هدف اکثر مطالعات انجام‌شده، ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی برای اهداف مختلف از جمله؛ پیش‌بینی کمیت سیلاب، شناسایی مناطق سیل‌خیز و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب سطحی بوده است اما با وجود جامع بودن مدل WMS، تاکنون این مدل برای حوضه مورد مطالعه (حوضه آبخیز بابلرود) ارزیابی نشده است که با توجه به بالا بودن بارش در حوضه‌های شمالی کشور و در نتیجه بالا بودن احتمال رویداد سیلاب، به نظر لازم است مدل WMS برای حوضه‌های شمالی کشور مورد ارزیابی قرار گیرد تا در پیش‌بینی سیلاب این حوضه‌ها، از آن استفاده شود علاوه بر این از مدل ارزیابی شده می‌توان برای بررسی اثرات سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای (سناریوهای تغییر اقلیم) نیز استفاده نمود. از این‌رو در این تحقیق یکی از زیرحوضه‌های شمال کشور (یکی از زیرحوضه‌های بابلرود) برای مدل‌سازی بارش-رواناب انتخاب شد و مقدار سیلاب برای بارش طرح با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه شد. تا از این طریق بتوان سیلاب‌های منطقه مورد مطالعه (با دور بازگشت‌های مختلف) را پیش‌بینی کرد تا در مدیریت سیلاب و همچنین طراحی سازه‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور از مدل جامع WMS که می‌تواند با لینک شدن به GIS اطلاعات اولیه را استخراج کند استفاده شد.

^۱ Watershed Modeling System

(SCS) و برای محاسبه هیدروگراف رواناب از هیدروگراف واحد اشنایدر استفاده شد. مقادیر CN در ابتدا بر اساس نوع پوشش گیاهی و کاربری اراضی تعیین گردید و با میان‌گیری وزنی CN منطقه مشخص شد. لازم به ذکر است که در این مرحله هدف تخمین مناسبی از CN برای انجام شبیه‌سازی حوضه توسط مدل می‌باشد و گرنه، CN یکی از پارمترهای واسنجی مدل WMS می‌باشد.

آبراهه‌ها از روی DEM استخراج شود. مشخصات فیزیوگرافیک حوضه از جمله شیب، مساحت و طول آبراهه‌ها توسط مدل محاسبه می‌شود. از مدل‌های بارش-رواناب موجود در مدل WMS، مدل HEC-1 مستقلاً در داخل خود مدل قابلیت اجرا دارد. بنابراین در این تحقیق برای شبیه‌سازی رواناب از مدل HEC-1 موجود در مدل WMS استفاده گردید. برای محاسبه میزان هدر رفت بارش از روش پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

رویداد که بارش روزانه و ساعتی آن باهم همخوانی داشتند و برای آن‌ها دبی سیلاب متناسب نیز در ایستگاه هیدرومتری ثبت شده باشد انتخاب گردید. از این ۵ رویداد، ۳ رویداد برای واسنجی و ۲ مورد هم برای ارزیابی مدل استفاده شد. مشخصات این رویدادهای بارش در جدول (۱) ارائه شده است. پارامترهای مورد واسنجی مدل، شماره منحنی (CN)، درصد غیرقابل نفوذ، زمان تأخیر حوضه (TP) و ضریب مساحت حوضه (CP) می‌باشند.

۳.۲. ارزیابی مدل WMS

واسنجی یکی از بخش‌های اصلی ارزیابی عملکرد مدل است. هدف از واسنجی یک مدل بارش-رواناب، تعیین برخی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز به منظور تعمیم آن در موقعیت‌های دیگر می‌باشد. در این مطالعه با بررسی بارش‌های روزانه و ساعتی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶ (که داده‌های هیدرومتری موجود بودند) مشخص گردید، اکثر رویدادهای بارش روزانه و ساعتی باهم تناسبی ندارند. بنابراین از بارش‌های این بازه زمانی، ۵

جدول ۱. مشخصات رویدادهای بارش استفاده شده در ارزیابی مدل

مدت بارش (h)	مقدار بارش (mm)	تاریخ رویداد	بارش	مرحله
۱۴/۵	۴۳/۸	۹۰/۰۸/۱۵	۱	واسنجی
۲۸/۵	۴۴/۲	۹۴/۱۲/۱۰	۲	
۱۷/۵	۱۱/۴	۹۴/۱۲/۲۶	۳	
۸/۵	۱۰/۶	۹۴/۱۱/۱۴	۴	اعتبار سنجی
۱۰	۲۱/۲	۹۵/۰۱/۲۹	۵	

در این روابط O_i مقادیر مشاهداتی، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده، Q مقدار دبی و n تعداد سال‌های آماری مورد مطالعه است. شاخص Er نشان‌دهنده روند کلی مقدار خطا می‌باشد. این شاخص زمانی می‌تواند گویای مقدار واقعی خطا باشد که مقدار ضریب R^2 ضعیف نباشد. نش - ساتکلیف یک ضریب بی‌بعد است که می‌تواند مقاداری بین $-\infty$ تا یک باشد و مقدار یک در این شاخص، نشان‌دهنده تطابق کامل هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است. اگر NSE بزرگ‌تر از $0/75$ باشد، عملکرد مدل خوب، اگر NSE بین $0/36$ تا $0/75$ باشد عملکرد مدل رضایت‌بخش، و اگر NSE کوچک‌تر از $0/36$ باشد، عملکرد مدل نامطلوب ارزیابی می‌شود [۶]. $RMSE$ نشان می‌دهد که خطای مدل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی چقدر است. $RMSE$ می‌تواند با تقسیم شدن به مقدار میانگین داده‌های مشاهداتی به‌عنوان $RMSE$ نرمال شده ($NRMSE$) که ضریبی بدون بعد است تعریف شود. شاخص CRM نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش‌ازحد یا کمتر از حد در مقایسه با مقادیر مشاهداتی است. چنانچه تمام مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی باهم برابر شوند، مقدار عددی آماره‌های $RMSE$ ، CRM و $NRMSE$ برابر صفر می‌شود [۱۵].

۴.۲. تعیین مقدار و الگوی توزیع باران طرح

باران طرح از نظر تئوری به دوره‌ای از یک بارندگی شدید همراه با باد گفته می‌شود که بتواند ارتفاع مشخصی

ارزیابی مدل با پارامترهایی که از طریق واسنجی اصلاح شده‌اند را اعتبارسنجی گویند. اگر مدلی، شبیه‌سازی خوبی در مرحله اعتبارسنجی داشته باشد، قادر خواهد بود که رویدادهای آینده را به‌خوبی پیش‌بینی کند. برای ارزیابی مدل از نمودار یک‌به‌یک و شاخص‌های آماری میانگین ریشه دوم خطا ($RMSE$)، $RMSE$ نرمال شده ($NRMSE$)، ضریب باقیمانده (CRM) و ضریب نش - ساتکلیف (NSE) استفاده شد. مقدار Er که در این تحقیق به‌عنوان مقدار متوسط خطا شناخته می‌شود نشان‌دهنده درصد انحراف شیب خط برازش داده شده به داده‌های دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی (λ) از شیب خط ۴۵ درجه می‌باشد:

$$Er = |(1 - \lambda)| \times 100 \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (4)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5)$$

یکسان نخواهد بود [۲۰]. در این مطالعه با بررسی بارش‌های روزانه ایستگاه فیروزجاه، الگوی کلی بارش روزانه منطقه تعیین گردید و از این الگو، برای تبدیل باران طرح به باران ساعتی استفاده شد و در نهایت، با وارد نمودن بارش‌های طرح در مقیاس نیم ساعتی به مدل WMS، سیلاب ناشی از این بارش‌ها شبیه‌سازی گردید.

۳. نتایج و بحث

۳.۲. نتایج ارزیابی مدل

پس از استخراج نقشه توپوگرافی از روی نقشه رقومی (DEM)، شبکه آبراهه‌ها ترسیم شد (شکل ۲) و با انتخاب محل ایستگاه هیدرومتری بر روی شبکه آبراهه، مرز حوضه بالادست ایستگاه تعیین شد. با تعیین درصد هرکدام از کاربری‌های اراضی و مشخص نمودن CN مربوط به این کاربری‌ها متوسط وزنی CN منطقه، ۷۴ تعیین شد و به‌عنوان تخمین اولیه در واسنجی مدل از آن استفاده شد. از آنجایی که درصد مناطق غیرقابل نفوذ یکی از پارامترهای مدل برای واسنجی می‌باشد مقدار تقریبی این مناطق از روی نقشه کاربری اراضی، ۱۰ درصد تعیین شد.

به‌منظور واسنجی مدل از میان ۵ رگبار مشاهداتی، ۳ رگبار شماره ۱، ۲ و ۳ انتخاب شد. نتایج مربوط به پارامترهای واسنجی شده در جدول (۲) و ارائه شده است. با توجه به اهمیت دبی پیک و حجم سیلاب، درصد اختلاف (رابطه ۸) مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دبی پیک و حجم سیلاب، در جدول (۳) ارائه شده است.

$$\text{درصد اختلاف} = \frac{X_m - X_s}{X_m} \times 100 \quad (8)$$

که در آن، X نمایانگر مقادیر دبی اوج و حجم سیلاب، اندیس m و S نیز به ترتیب معرف مقدار مشاهداتی و شبیه‌سازی می‌باشند.

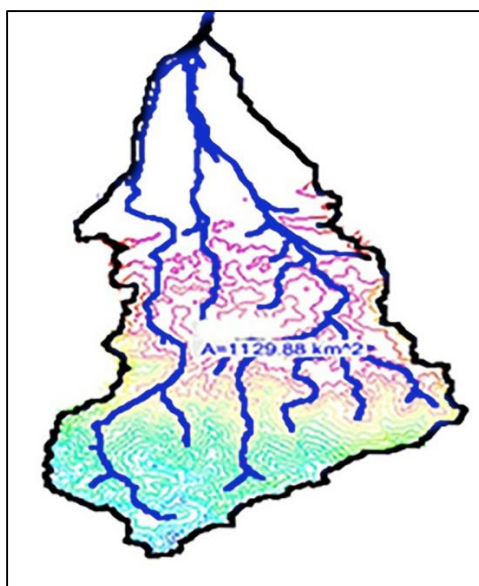
از نظر مقدار و شدت بارش تولید نماید و برای سازه آبی خطرناک باشد. در ایستگاه‌های هواشناسی معمولاً بارندگی‌ها در هر شبانه‌روز یک بار اندازه‌گیری و تحت عنوان بارش ۲۴ ساعته ثبت می‌شود. بارش ۲۴ ساعته به این معنی نیست که بارش به مدت ۲۴ ساعت ادامه داشته باشد. ممکن است در طول ۲۴ ساعته یک بارش و یا چندین رگبار صورت گرفته باشد که جمع بارندگی آن‌ها ثبت می‌شود. در اکثر روش‌های طراحی بارش ۲۴ ساعته ملاک قرار می‌گیرد نه مقدار بارشی که در یک رگبار خاص ریزش داشته است [۳]. بنابراین در این تحقیق برای محاسبه باران طرح از تداوم ۲۴ ساعت استفاده گردید. برای تعیین مقدار بارش طرح در دوره بازگشت‌های مختلف (۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ساله) از روابط تجربی (۶) و (۷) استفاده شد که توسط قهرمان برای ایران ارائه شده است [۷].

$$R_t^T = At^B [a_1 + a_2 \ln(T - a_3)] R_{60}^{10} \quad (6)$$

$$R_{60}^{10} = 9.99 + 0.212(R_{1440}^2) \quad (7)$$

که در آن R_t^T : مقدار بارندگی در دوره بازگشت T ساله و مدت بارندگی (t) مورد نظر (میلی‌متر)، A و B: ضرایب ثابت محلی، t: مدت بارش طرح (ساعت)، a_1 ، a_2 ، a_3 : ضرایب رابطه، R_{60}^{10} : مقدار باران یک‌ساعته با دوره بازگشت ۱۰ ساله برحسب میلی‌متر و R_{1440}^2 : میانگین حداکثر بارش روزانه است. طبق پیشنهاد قهرمان، برای بارش‌های بیش‌تر از ۹ ساعت، A و B به ترتیب ۰/۱۵۸۹ و ۰/۴۳۶۱ و مقادیر a_1 و a_2 و a_3 به ترتیب ۰/۵۵۶۵ و ۰/۱۹۴۸ و ۰/۸ تعیین شد. لازم به ذکر است رابطه ۷ برای مناطق شمال کشور توسط قهرمان پیشنهاد شده است [۷].

پانی و هاراگان معتقدند که الگوی بارش باید برای هر حوضه با استفاده از داده‌های بارندگی همان حوضه تهیه شود زیرا برای مناطقی که اقلیم متفاوت دارند این الگو



شکل ۲. شبکه آبراهه‌ها

جدول ۲. مقادیر بهینه شده نتایج اجرای واسنجی پارامترهای مدل WMS

مقادیر بهینه	پارامترهای کالیبراسیون
۷۲	شماره منحنی
٪۱۵	درصد غیرقابل نفوذ
۱۲	TP (h)
۰/۵۶	CP

جدول ۳. مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رویدادها در مرحله واسنجی

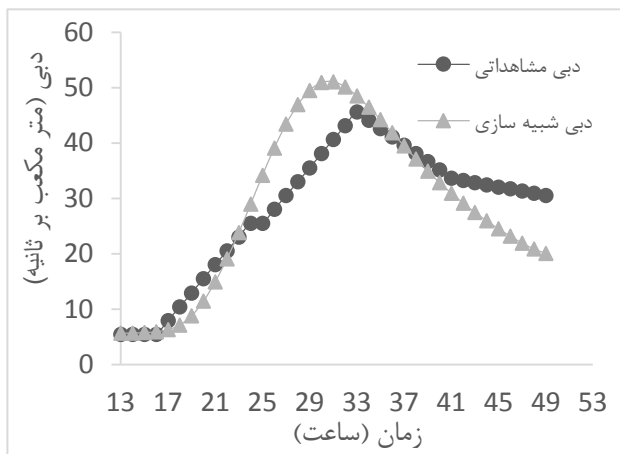
اختلاف	حجم جریان (m ³)		اختلاف	دبی اوج (m ³ /s)		پارامتر	رویداد
	مشاهداتی	شبیه‌سازی		مشاهداتی	شبیه‌سازی		
٪			٪				
۱/۵	۳۷۳۷۳۵۸	۳۷۹۶۴۳۸	۱۱/۹	۴۵/۶	۵۱/۰۵		۱
۸/۹	۶۸۰۶۵۲۰	۶۱۹۵۸۹۹	۴/۰	۴۵	۴۶/۸۰		۲
۰/۰۳۶	۲۲۰۰۱۴۰	۲۱۹۹۳۳۷	۱/۰	۲۳/۳	۲۳/۰۷		۳
۳/۵	-	-	۵/۶	-	-		میانگین

چشم‌گیری می‌یابد به طوری که در رویداد سوم مقدار خطا به ۱ درصد می‌رسد. به طور کلی میانگین خطای مدل در شبیه‌سازی دبی اوج برای مرحله واسنجی حدود ۵/۶ درصد می‌باشد. خطای مدل در مورد حجم رواناب شبیه‌سازی

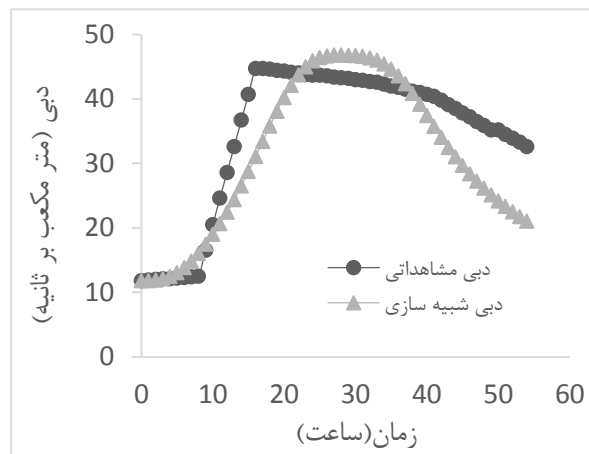
مقایسه دبی اوج شبیه‌سازی و مشاهداتی در سه بارش شماره ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف مدل در شبیه‌سازی دبی اوج حدود ۱۲ درصد و مربوط به بارش شماره ۱ می‌باشد، در دو رویداد دیگر مقدار خطا کاهش

حدود ۰/۰۴ درصد می‌باشد و میانگین خطای مدل در شبیه‌سازی حجم رواناب حدود ۳/۵ درصد تعیین گردید.

شده حتی از خطای مربوط به دبی اوج نیز کمتر می‌باشد به طوری که حداکثر خطا حدود ۹ درصد و حداقل آن



رویداد ۱



رویداد ۲



رویداد ۳

شکل ۳. هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی

جدول (۴) نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی شکل هیدروگراف خطای بیشتری مرتکب گردیده است. این مطلب از مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نیز قابل استنباط است.

جهت اعتبار سنجی مدل از ۲ رویداد شماره ۴ و ۵ استفاده شد، که در واسنجی مورد استفاده قرار نگرفتند. نتایج اعتبارسنجی مدل در برآورد دبی اوج و حجم سیلاب

برای تعیین توانایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب در مرحله واسنجی، دبی هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی در بازه‌های نیم‌ساعته مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۳) که شاخص‌های آماری مربوط به این مقایسه در جدول (۴) ارائه گردیده است.

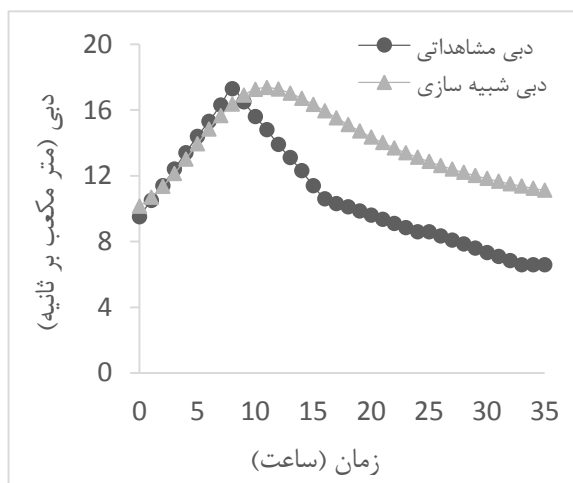
با اینکه مدل در شبیه‌سازی دبی اوج و حجم سیلاب بسیار خوب عمل نموده است اما نتایج شاخص‌های آماری

مشاهداتی و شبیه‌سازی به ترتیب در شکل (۴) و جدول (۶) نمایش داده شده‌اند.

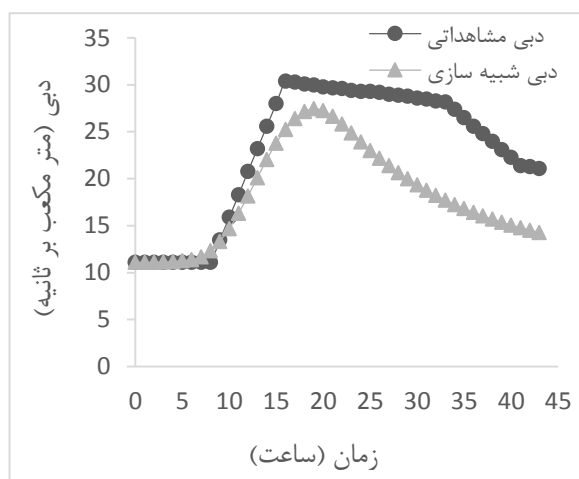
در جدول (۵) ارائه گردیده است. در ادامه نمودار و شاخص‌های آماری مربوط به مقایسه هیدروگراف

جدول ۴. مقادیر آماره‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در مرحله واسنجی

رویداد	مرحله	NRMSE (%)	CRM (m ³ /s)	NSE	R ²	Er (%)
۱	واسنجی	۲۴/۰۴	-۰/۰۱۶	۰/۶۹	۰/۷۹	۳
۲	واسنجی	۱۸/۴۳	۰/۰۸۹	۰/۶۹	۰/۷۹	۹
۳	واسنجی	۴/۸۳	۰/۰۰۰۵۲	۰/۶۳	۰/۷۴	۱
میانگین		۱۵/۸	۰/۰۳۵	۰/۶۷	۰/۷۷	۴/۳



رویداد ۴



رویداد ۵

شکل ۴. هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبار سنجی

جدول ۵. مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دبی و حجم سیلاب در مرحله اعتبار سنجی

اختلاف	حجم جریان (m ³)		اختلاف	دبی اوج (m ³ /s)		پارامتر	رویداد
	مشاهداتی	شبیه‌سازی		مشاهداتی	شبیه‌سازی		
۳۰/۷	۱۳۷۱۹۲۴	۱۷۹۳۴۵۸	۰/۴۰	۱۷/۳	۱۷/۳۷		۴
۲۰/۶	۳۶۱۶۳۸۰	۲۸۷۱۵۹۴	۹/۷	۳۰/۴	۲۷/۴۶		۵
۲۵/۷	-	-	۵/۱	-	-		میانگین

جدول ۶. مقادیر آماره‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در مرحله اعتبار سنجی

رویداد	مرحله	NRMSE (%)	CRM (m ³ /s)	NSE	R ²	Er (%)
۴	اعتبار سنجی	۳۵/۳	-۰/۲۹	۰/۴۵	۰/۶۸	۲۲
۵	اعتبار سنجی	۲۵/۸	۰/۲۰	۰/۳۱	۰/۷۲	۲۲
میانگین		۳۰/۶	۰/۲۵	۰/۳۸	۰/۷	۲۲

نشان دادند به طوری که NRMSE و Er خطای مدل را در برآورد هیدروگراف به ترتیب حدود ۳۰ و ۲۲ درصد تعیین نمودند که همه این آماره‌ها در بازه قابل قبول قرار دارند و نشان از کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب دارند. با دقت در مقدار آماره CRM نیز می‌توان متوجه شد که در رویداد شماره ۵، به طور کلی مدل برآورد کمتری از دبی‌های مشاهداتی داشته است اما در رویداد شماره ۴، برآورد مدل، بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری بوده است. مقدار R^2 ناشی از نمودار یک‌به‌یک دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی؛ نیز در محدوده قابل قبولی قرار دارد. به طور کلی می‌توان گفت مدل توانسته است با دقت قابل قبولی مقدار دبی اوج و حجم سیلاب را برآورد نماید و در برآورد هیدروگراف سیلاب نیز دقت مناسبی داشته است. مارکو و همکاران [۱۴]، یوسف و همکاران [۲۵]، نیازی و همکاران [۱۸]، پریسوژ و همکاران [۲۱] و قبادیان و همکاران [۸] نیز به نتیجه مشابهی رسیدند. لازم به ذکر است مقداری از خطای مدل ناشی از نامناسب بودن داده‌های اندازه‌گیری می‌باشد که بعضاً مقدار بارش روزانه با مجموع بارش ساعتی همان روز هم‌خوانی نداشتند. همچنین مقادیر دبی اندازه‌گیری نیز عاری از خطا نمی‌باشند. لذا خطای حدود ۳۰ درصد برای مدل‌های بارش-رواناب خطای مناسبی محسوب می‌شود. در مطالعات مشابهی که در کشور صورت گرفته‌اند به دلیل کمبود داده مناسب، معمولاً محققین برای ارزیابی مدل به‌ناچار از تعداد رویداد بارش کمتری برای ارزیابی مدل استفاده نمودند به‌عنوان مثال؛ قبادیان و همکاران [۸] برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل WMS به ترتیب از ۲ و ۱ رویداد بارش، الماسی و همکاران [۴]، برای واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب از ۴ و ۳ رویداد بارش و پریسوژ و همکاران [۲۱]، برای واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب از ۳ و ۳ رویداد بارش استفاده کردند. نتایج این تحقیق نیز از این محدودیت بی‌بهره نبوده است و در صورت وجود داده‌های بارش و رواناب مناسب بیشتر، نتایج ارزیابی مدل می‌تواند قابل‌اعتمادتر باشد.

با دقت در شکل (۴) می‌توان دریافت که مدل توانسته شکل کلی هیدروگراف را به خوبی شبیه‌سازی نماید. در هر دو رویداد بارش، مدل توانسته بازوی بالارونده هیدروگراف مشاهداتی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نماید. اما در شبیه‌سازی بازوی پایین‌رونده دقیق عمل نکرده است. با توجه به تغییر همه پارامترهای دخیل در واسنجی مدل و انتخاب بهینه‌ترین مقدار برای این پارامترها، به نظر می‌رسد خطای مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف، بیشتر به دلیل خطای اندازه‌گیری داده‌های بارش و رواناب باشد. این موضوع در رویداد شماره ۵ بیشتر به چشم می‌خورد. چراکه با توجه به هیدروگراف سیلاب این رویداد، مشخص می‌شود که دبی اوج حدود ۲۰ ساعت تقریباً بدون تغییر (حدود ۳۰ مترمکعب بر ثانیه) بوده است. با توجه به کوچک بودن منطقه مورد مطالعه، انتظار می‌رود بارش متناظر با این سیلاب، از تداوم زمانی بیشتری برخوردار باشد ولی این گونه نبوده است.

با توجه به جدول (۵)، مقدار اختلاف برای دبی اوج برای دو رویداد بارش در مرحله اعتبارسنجی، حدود ۱۰ و ۵/۰ درصد تعیین شده است که می‌توان عنوان نمود؛ متوسط قدر مطلق خطای مدل در شبیه‌سازی دبی اوج در این مرحله حدود ۵ درصد می‌باشد؛ اما در مورد حجم سیلاب، خطای مدل بیشتر می‌باشد و میانگین قدر مطلق خطای مدل در برآورد حجم سیلاب حدود ۲۵ درصد است که رقم قابل قبولی است. علت ایجاد چنین خطایی در برآورد حجم سیلاب، به پایین بودن دقت مدل در برآورد بازوی پایین‌رونده هیدروگراف برمی‌گردد که در پاراگراف قبلی مورد بحث قرار گرفت. اما به طور کلی؛ با توجه به خطای مدل در برآورد دبی اوج و حجم سیلاب، می‌توان گفت مدل با دقت خوبی این دو پارامتر را شبیه‌سازی نموده است.

با دقت در مقادیر شاخص‌های آماری مندرج در جدول (۶) مشخص می‌شود که آماره NSE نشان از راندمان حدود ۳۷ درصد مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف دارد اما بقیه آماره‌ها خطای کمتری را برای برآورد هیدروگراف

۲.۳. نتایج سیلاب باران طرح

نمودن الگوی بارش مربوط به باران طرح به مدل ارزیابی شده WMS، هیدروگراف سیلاب ناشی از بارش‌های طرح شبیه‌سازی گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل برای دو خصوصیت اصلی هیدروگراف یعنی دبی اوج و حجم رواناب برای دوره گذشته در جدول (۸) ارائه شده است.

بارش‌های طرح با دوره بازگشت‌های مختلف (۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ساله) با استفاده از رابطه (۶) تعیین شدند و نتایج در جدول (۷) ارائه گردید. با وارد

جدول ۷. مقادیر باران طرح با دوره بازگشت‌های مختلف (میلی‌متر)

دوره بازگشت (سال)	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۵۰۰
باران طرح (میلی‌متر)	۴۶/۷	۶۶/۰	۷۸/۰	۹۲/۹	۱۰۳/۸	۱۱۴/۶	۱۳۹/۴

جدول ۸. مقادیر دبی اوج (m^3/s) و حجم سیلاب (میلیون مترمکعب) برای باران‌های طرح

دوره بازگشت	دبی اوج (m^3/s)	حجم سیلاب (Mm^3)
۲	۴۹/۸	۶/۶
۵	۹۰/۷	۱۰/۸
۱۰	۱۲۰/۲	۱۳/۸
۲۵	۱۵۹/۸	۱۷/۹
۵۰	۱۹۰/۵	۲۱/۲
۱۰۰	۲۲۲/۱	۲۴/۵
۵۰۰	۲۹۸/۴	۳۲/۴

خسارات آن مورد استفاده قرار گیرد.

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر مدل بارش-رواناب WMS برای یکی از سرشاخه‌های بابل‌رود مورد ارزیابی قرار گرفت و با استفاده از پنج رویداد بارش، واسنجی و اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان داد که مدل با دقت بالایی دو خصوصیت اصلی هیدروگراف سیلاب یعنی دبی و حجم سیلاب را شبیه‌سازی می‌کند؛ به طوری که متوسط اختلاف دبی اوج شبیه‌سازی و مشاهداتی در مرحله اعتبارسنجی حدود ۵ درصد تعیین گردید. این اختلاف برای حجم سیلاب حدود ۲۵ درصد محاسبه شد. پس از ارزیابی مدل، بارش‌های طرح با دور بازگشت مختلف (۲، ۵، ۱۰،

با توجه به جدول (۸)، مقدار دبی اوج از حدود m^3/s ۵۰ برای بارش دوساله تا m^3/s ۳۰۰ برای بارش ۵۰۰ ساله متغیر می‌باشد و حجم سیلاب نیز از Mm^3 ۶/۶ تا Mm^3 ۳۲/۴ به ترتیب برای بارش ۲ ساله تا ۵۰۰ ساله تغییر می‌کند. با توجه به جداول ۸ و ۹ مشخص می‌شود که با افزایش حدود سه برابری مقدار بارش طرح (بارش ۲ ساله در مقایسه با بارش ۵۰۰ ساله) مقدار دبی اوج حدود ۶ برابر و حجم سیلاب ۵ برابر افزایش می‌یابد. دلیل این امر هم، تلفات اولیه بارش می‌باشد که در همه بارش‌های طرح، یکسان است و با افزایش مقدار بارش، پتانسیل تولید رواناب افزایش می‌یابد. از آنجایی که سازه‌های آبی بر اساس دبی طرح، طراحی می‌شوند؛ می‌توان از نتایج این تحقیق برای این منظور استفاده نمود. علاوه بر این حجم سیلاب نیز می‌تواند برای مدیریت سیلاب و کاهش

بارش‌ها از ۶/۶ تا ۳۲/۴ میلیون مترمکعب به ترتیب برای بارش طرح ۲ ساله و ۵۰۰ ساله متغیر بود. نتایج این تحقیق می‌تواند برای مدیریت سیلاب و کاهش خسارات ناشی از آن در منطقه مورد مطالعه مفید واقع شود. همچنین از نتایج به دست آمده می‌توان برای طراحی سازه‌های آبی استفاده نمود که بر اساس دبی طرح، طراحی می‌شوند.

۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ساله) محاسبه شدند و با وارد نمودن این بارش‌ها به مدل ارزیابی شده WMS، هیدروگراف سیلاب ناشی از این بارش‌ها شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در صورت بروز بارش طرح ۲ ساله، دبی اوج سیلاب به حدود ۵۰ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد، این مقدار برای بارش طرح ۵۰۰ ساله حدود ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه برآورد شد. حجم سیلاب حاصل از این

References

- [1] Abbaspour, K. C., Johnson, A. and Van Genuchten, M.T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3 (4), 1340–1352.
- [2] Ahbari, A., Stour, L., Agoumi, A. and Serhir, N. (2018). Estimation of initial values of the HMS model parameters: application to the basin of Bin El Ouidane (Azilal, Morocco). *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 1(9), 305–317.
- [3] Alizadeh, A. (2011). *Principles of Applied Hydrology*, 29th Edition, University of imam reza.
- [4] Almasi, P., Soltani, S., Goodarzi, M. and Modarres, R. (2017). Assessment the Impacts of Climate Change on Surface Runoff in Bazoft Watershed. *Journal of Water and Soil Science*, 78(20). 39 – 52.
- [5] Arvand, S., Delghandi, M., ganji, Z. and Alipour, A. (2020). Evaluation of Storm Water Management Model (SWMM5.0) in simulation of urban runoff (case study: urban catchment of Neyshabur). *Irrigation & Water Engineering*, 39(10), 68 – 81.
- [6] Baginska, B., Milne-Home, W. and Cornish, P. S. (2003). Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW, with Ann-AGNPS and PEST. *Environmental Modelling and Software*, 8-9(18), 801–808.
- [7] Ghahraman, B. and Abkhezr, H. (2004). Duration-Frequency Relationships of Rainfall in Iran. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 2(8), 1-14.
- [8] Ghobadiyan, R., Jahandideh, K. and Fatahi Chaghbagi, A. (2012). Simulation of the Rainfall-Runoff Process in the Gharasoo Catchment using WMS Model. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 9(3), 89-98.
- [9] Goodarzi, M., Salahi, B. and Hossini, S.A. (2019). Assessment of IHACRES Model in Simulating River Discharge in Urmia Lake Basin. *Iranian journal of Watershed Management Science and Engineering*, 43(12), 1-10.
- [10] Gumindoga, W., Rwasoka, D. T., 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, Parts A/B/C*, 100, 371–382.
- [11] Haddeland, I., Clark, D. B., Franssen, W., Ludwig, F., Voß, F., Arnell, N. W., Bertrand, N., Best, M., Folwell, S., Gerten, D., Gomes, S., Gosling, S. N., Hagemann, S., Hanasaki, N., Harding, R., Heinke, J., Kabat, P., Koirala, S., Oki, T., Polcher, J., Stacke, T., Viterbo, P., Weedon, G. P. and Yeh, P. (2011). Multimodel estimate of the global terrestrial water balance: setup and first results. *Journal of Hydrometeorology*, 12, 869-884.
- [12] IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R. K. and Meyer, L. A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 pp.
- [13] Kauffeldt, A., Wetterhall, F., Pappenberger, F., Salamon, P. and Thielen, J. (2016). Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. *Environmental Modelling and Software*, 75, 68–76.

- [14] Marko, K., Elfeki, A., Alamri, N. and Chaabani, A. (2018). Two Dimensional Flood Inundation Modelling in Urban Areas Using WMS, HEC-RAS and GIS (Case Study in Jeddah City, Saudi Arabia. 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1), 12-15 November, Sousse, Tunisia 2018, pp. 265–267.
- [15] Mattar, M. A. and Alamoud, A. I. (2017). Gene expression programming approach for modeling the hydraulic performance of labyrinth-channel emitters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 450-460.
- [16] Moradkhani, H., Sorooshian, S., Gupta, H. V. and Houser, P. (2005). Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter. *Advances in Water Resources*, 2 (28), 135–147.
- [17] Mousavi, S. J., Abbaspour, K. C., Kamali, B., Amini, M. and Yang, H. (2012). Uncertainty-based automatic calibration of HEC-HMS model using sequential uncertainty fitting approach. *Journal of Hydroinformatics*, 14(2), 286–309.
- [18] Niyazi, B. A., Masoud, M. H., Ahmed, M., Basahi, J. M. and Rashed, M. A. (2020). Runoff assessment and modeling in arid regions by integration of watershed and hydrologic models with GIS techniques. *Journal of African Earth Sciences*, 172, 103966.
- [19] Nouri, F., Behmanesh, j., Mohammad Nejad, B.A. and Rezaei, H. (2012). Evaluation of WMS/HEC-HMS Model in Forecasting of Ghorve Watershed. *Journal of Water and Soil Conservation*, 4(19), 201-210.
- [20] Pani, E.A. and Haragan, D. R. (1981). A comparison of Texas and Illinois Temporal Rainfall Distributions. 4th Conference on Hydrometeorology, American Meteorology Society, Boston, USA, pp. 76-80.
- [21] 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*, 3(14), 174-188.
- [22] Rafiei Emam, A., Mishra, B., Kumar, P., Masago, Y. and Fukushi, K. (2016). Impact Assessment of Climate and Land-Use Changes on Flooding Behavior in the Upper Ciliwung River, Jakarta,
- [23] Srinivas, R., Singh, A. P. and Deshmukh, A. (2018). Development of a HEC-HMS-based watershed modeling system for identification, allocation, and optimization of reservoirs in a river basin, *Environmental Monitoring and Assessment*. 190(31), <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6418-0>
- [24] Tolson, B.A. and Shoemaker, C. A. (2008). Efficient prediction uncertainty approximation in the calibration of environmental simulation models. *Water Resources Research*, 44, W04411, doi: 10.1029/2007WR005869.
- [25] Youssef, A. M. A., Ibrahim, S. M. M., El Sayed, A. N. and Masoud, M. H. Z. (2020). Assessment and management of water resources in Wadi El-Deeb using geophysical, hydrological and GIS Techniques-Red Sea. *Journal of African Earth Sciences*, 164, 103777.
- [26] Zhang, H. L., Wang, Y. J., Wang, Y. Q., Li, D. X. and Wang, X. K. (2013). The effect of watershed scale on HEC-HMS calibrated parameters: a case study in the Clear Creek watershed in Iowa, US. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 2735–2745.

