

مدل‌سازی و روندیابی سیلاب در حوزه‌های فاقد آمار (مطالعه موردی؛ آبخیز تمر، استان گلستان)

رئوف مصطفی‌زاده * - دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب دانشگاه محقق اردبیلی.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۳/۱۹

چکیده

در این پژوهش هیدروگراف رواناب مستقیم آبخیز تمر در شرق استان گلستان با مساحتی در حدود ۱۵۱۵ کیومترمربع به کمک خصوصیات فیزیوگرافی و تابع توزیع گاما مدل‌سازی شده است. پس از تقسیم منطقه مورد مطالعه به واحدهای هیدرولوژیک و محاسبه پارامترهای مورد نیاز در شبیه‌سازی جریان، فرایند بارش-رواناب در هر واحد هیدرولوژیک مدل‌سازی شده و جریان حاصل با استفاده از روش هیدرولوژیک ماسکینگام در بازه‌های عبوری از زیرحوزه‌ها روندیابی شد. سپس با در نظر گرفتن موقعیت زیرحوزه‌ها و تاخیر جریان، هیدروگراف سیلاب در تعداد هشت رگبار مدل‌سازی شد. نتایج مقایسه هیدروگراف‌های مدل‌سازی شده و مشاهداتی با مقادیر میانگین معیارهای ضریب تبیین (۶۰٪)، و شاخص توافق (۷۴٪) نشان داد که روش مورد استفاده در مدل‌سازی هیدروگراف‌های سیلاب، دارای دقت تقریباً قابل قبولی است. بر اساس نتایج پژوهش، با توجه به امکان استفاده از پارامترهای سهل‌الوصول و خصوصیات فیزیوگرافی آبخیز به‌عنوان رویکرد مناسبی در مدل‌سازی روندیابی سیلاب وجود دارد. استفاده از روش‌های تجربی در برآورد پارامترهای روش مورد استفاده در روندیابی سیلاب و مدل‌سازی هیدروگراف‌های رواناب مستقیم از دیگر موارد برجسته در پژوهش حاضر است که بر انجام مطالعات پیش‌تری در خصوص روش‌های محاسبه پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل‌سازی هیدرولوژیک تاکید می‌کند.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی سیلاب، توزیع گاما، روندیابی جریان، روش ماسکینگام، خصوصیات فیزیوگرافی.

مقدمه

پیش‌بینی سیلاب و مدل‌سازی آبخیز از موضوعات اصلی کار هیدرولوژیست‌ها در فرایند تبدیل بارش به هیدروگراف رواناب و عبور جریان در یک آبخیز است (نجفی، ۱۳۸۱: ۲۱؛ لیو^۱ و همکاران، ۲۰۰۳). در طراحی برخی سیستم‌های آبی، اطلاع از تغییرات دبی نسبت به زمان (هیدروگراف)، مورد نیاز است. برای برآورد سیلاب حداکثر لحظه‌ای در مناطق فاقد آمار می‌توان از فرمول‌های تجربی، هیدروگراف مصنوعی، روش شبیه‌سازی، تخمین آماری دبی حداکثر لحظه‌ای، آنالیز منطقه‌ای و روش شاخص سیلاب استفاده نمود که هر کدام در شرایطی خاص قابل کاربرد هستند و در این میان تنها روش‌هایی که منجر به تهیه هیدروگراف یا آبنمود می‌شوند قادر هستند جزئیات دقیقی از خصوصیات سیل ارائه نمایند (نجفی، ۱۳۸۱؛ بهره‌مند و مصطفی‌زاده، ۱۳۸۹: ۴۲). مدیریت سیلاب بر اساس روش‌های مبتنی بر تحلیل هیدروگراف در حوزه‌های بدون ایستگاه هیدرومتری امری بسیار مشکل است، لذا استفاده از روش‌های تجربی و پارامترهای فیزیوگرافی در مدل‌های پیش‌بینی سیل می‌تواند مورد توجه قرار گیرد (جین و سینه‌آ، ۲۰۰۳). رواناب مستقیم یک آبخیز علاوه بر توزیع زمانی و مکانی بارش، به خصوصیات خاک، توپوگرافی، ژئومورفولوژی و شبکه زهکشی آبخیز وابسته است. به‌طور مشخص رابطه نزدیکی میان خصوصیات ژئومورفولوژیک و واکنش هیدرولوژیک یک حوضه وجود دارد (آگیر و همکاران^۲، ۲۰۰۵: ۳۲۲؛ جین و سینه‌آ^۳، ۲۰۰۳: ۳۵۶). به نقل از بونیا^۴ و همکاران (۲۰۰۷: ۲۹)، تابع چگالی احتمال^۵ توزیع‌های گاما^۶ و بتا، برای نمایش شکل هیدروگراف واحد به‌ترتیب توسط کرولی، ۱۹۸۰ و هاگتاینر و سزن، ۱۹۹۰ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده از توزیع گاما، به دلیل تولید شکل صاف و واحد هیدروگراف سیل و نیز سهولت استخراج پارامترهای آن از خصوصیات ژئومورفولوژیک آبخیز، گسترش قابل توجهی پیدا نموده است (بونیا و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۹؛ رای^۷ و همکاران، ۲۰۰۹: ۹۰۰). در توسعه استفاده از توابع چگالی احتمال را در پیش‌بینی شکل هیدروگراف، یو^۸ و همکاران (۲۰۰۲: ۱۴۷)، پژوهش‌های جامعی انجام داده‌اند. لیو و همکاران، (۲۰۰۳: ۹۱)، با استفاده از رویکرد انتقال پخشیدگی^۹ در بستر GIS به مدل‌سازی سیلاب در منطقه اترت^{۱۱} واقع در لوگزامبورگ^{۱۲} پرداختند و نتیجه گرفتند که نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی از تشابه بسیار مناسبی برخوردار است. لهوم^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۴: ۲۰۳)، از مدل روندیابی ژئومورفولوژیک برای شبیه‌سازی سیلاب در آبخیز الباتان^{۱۴} در اکوادور^{۱۵} استفاده و بیان نمودند که دقت نتایج مدل مورد استفاده به میزان مدل روندیابی فیزیکی است. لویز و همکاران (۲۰۰۵: ۱۲۸)، آبخیز را به‌عنوان آبشاری از مخازن متوالی فرض نمود و قابلیت آن را در شبیه‌سازی سیلاب در یک حوضه کشاورزی در مرکز اسپانیا مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که مدل پیشنهادی به تغییرات مقادیر پارامترهایی که در تخمین آن‌ها عدم قطعیت وجود دارد، حساسیت دارد. آگیر و همکاران (۲۰۰۵: ۳۲۱)، با در نظر گرفتن ساختار آبخیز در فرایند مدل‌سازی، روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ناش را توسعه داد و مدل هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیک مخازن را ارائه نمود و با آزمون مدل در حوضه‌ای واقع در کشور اسپانیا با ۱۸ رگبار نتیجه گرفت که نتایج

¹ - Liu

² - Jain and Sinha

³ - Agirre

⁴ - Jain and Sinha

⁵ - Bhunya

⁶ - Probability Density Function (PDF)

⁷ - Gamma distribution

⁸ - Rai

⁹ - Yue

¹⁰ - Diffusive transport approach

¹¹ - Attert

¹² - Luxembourg

¹³ - Lhomme

¹⁴ - El Batan

¹⁵ - Ecuador

مدل پیشنهادی تطابق خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد. سینگ^۱ و همکاران (۲۰۰۷: ۳۴۷)، هیدروگراف واحد لحظه‌ای را در پنج آبخیز کوچک تا متوسط در هند، چین و ترکیه محاسبه نمودند. ایشان در پژوهش خود حوضه را به صورت سری‌هایی از واحدهای هیبرید (متشکل از یک کانال خطی بدون اثر ذخیره در میان دو مخزن خطی) در نظر گرفتند. لی^۲ و همکاران (۲۰۰۸: ۴۰۳۷)، پس از تعیین رابطه میان شیب آبراهه و مقادیر ضریب ذخیره در توزیع گاما، وقوع سیلاب را در ۱۷ رخداد بارش در سه آبخیز در قسمت میانی رودخانه یانگ‌تسه در چین شبیه‌سازی نمودند و نتیجه گرفتند که روش پیشنهادی با درصد خطای نسبی کمتر کارایی مناسبی در استخراج هیدروگراف سیل دارد. رای و همکاران (۲۰۰۹: ۹۰۰)، پس از آزمون شش تابع توزیع آماری در استخراج هیدروگراف واحد در ۱۳ آبخیز از کشور هندوستان دریافتند که نتایج روش گاما از سایر روش‌ها در پیش‌بینی سیلاب مناسب‌تر بوده است. این مطالعه با توجه به اهمیت پیش‌بینی خصوصیات و شکل هیدروگراف سیل در امر برنامه‌ریزی برای کاهش خسارت ناشی از آن دارای اهمیت است. به دلایل مختلف، داده‌های رواناب کافی در اکثر آبخیزها با اندازه کوچک و متوسط، وجود ندارد. گونی^۳ و همکاران (۲۰۱۹: ۴۰) دو نوع هیدروگراف واحد لحظه‌ای بر اساس پارامترهای ژئومورفولوژیکی و مخازن خطی توسعه دادند که امکان اعمال بارش متغیر فضایی در آن امکان‌پذیر است. مدل‌های ارائه شده با داده‌های یک حوضه آبخیز دارای آمار در شمال اسپانیا واسنجی و اعتبارسنجی شد. تجزیه و تحلیل نتایج ایشان نشان داد که مدل‌های ارائه شده، تغییرپذیری مکانی بارندگی را در نظر می‌گیرند و قادر به شبیه‌سازی اثرات تغییرپذیری بارندگی در هیدروگراف رواناب سطحی هستند. وانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۱: ۷۲۴) مدلی را بر مبنای هیدروگراف واحد ژئومورفیک لحظه‌ای و توسعه مدل هیدروولوژیکی توزیعی توسعه دادند و کارائی مدل مذکور را در حوضه لیانیوان^۵ در استان هونان چین مورد آزمون قرار دادند. در روش پیشنهادی، بر اساس معادله انرژی جنبشی، سرعت جریان روزمینی و شبیه‌سازی هیدروگراف واحد ژئومورفیک محاسبه می‌شود. سپس شبیه‌سازی بارش-رواناب با تولید رواناب و تجمع انجام می‌شود. نتایج نشان داد که مدل مبتنی بر تبدیل انرژی منجر به نتایج دقیق‌تری می‌شود. آندریو^۶ و همکاران (۲۰۲۱) روشی برای استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی در مدل‌سازی رویداد سیل پیشنهاد دادند و نتایج مدل مذکور را در دو حوضه کوهستانی در اقلیم مدیترانه‌ای سونس-ویوارایس^۷ که در معرض سیل ناگهانی قرار دارند، ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که پارامترهای هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی با بزرگی رویداد سیل همبستگی دارند. بر اساس تحلیل حساسیت، نتایج E-GIUH^۸ حتی در مورد هیتوگراف‌های بارش موثر قبلی نیز پیش‌بینی نسبتاً مناسبی انجام می‌دهد. شتناوی و ابراهیم^۹ (۲۰۲۲: ۴۸۸۸) با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و هیدروگراف واحد مصنوعی SCS، هیدروگراف سیلاب آبخیز هوشا^{۱۰} مدل‌سازی نمودند و صحت نتایج را مورد تأیید قرار دادند. یائو^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل رقمی ارتفاع را بر عملکرد مدل هیدروولوژیکی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی در حوزه ژیاکنگ^{۱۲} کشور چین ارزیابی کردند. پس از اجرای مدل در شبیه‌سازی‌های مختلف مشخص شد که پارامترهای مدل کالیبره‌شده در قدرت تفکیک ۳۰ متر، بر شکل کلی هیدروگراف تأثیر کمی دارد، اما تأثیر

¹ - Singh

² - Li

³ - Goni

⁴ - Wang

⁵ - Lianyuan

⁶ - Andrieu

⁷ - Cevennes-Vivarais

⁸ - Event-specific Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph

⁹ - Shatnawi and Ibrahim

¹⁰ - Husha

¹¹ - Yao

¹² - Xiakeng

بیش‌تری بر دبی‌های اوج شبیه‌سازی شده دارد. نتایج ایشان نشان داد که اگر وضوح مدل رقومی ارتفاع خیلی درشت نباشد، تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع بر عملکرد مدل را می‌توان با کالیبراسیون مجدد مدل تا حدی کاهش داد. با توجه به اینکه الگوی بارش در زمان و مکان متغیر است و نیز کاربری اراضی دارای تغییرات تدریجی در یک حوزه است، استفاده از خصوصیات فیزیوگرافی در برآورد واکنش هیدرولوژیک و تعمیم نتایج به مناطق بدون آمار می‌تواند رویکرد مناسبی باشد. تلاش‌های متعددی برای ارتباط بین پارامترهای قابل اندازه‌گیری حوضه و پارامترهای مدل هیدرولوژیکی انجام گرفته است (سالاری‌جزی و همکاران، ۱۳۸۷؛ پورحاجی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸؛ ۲۲؛ هلوگر و میدمنت^۱، ۱۹۹۹؛ ۱۱؛ لویز و همکاران، ۲۰۰۵؛ ۱۲۹؛ لی و همکاران، ۲۰۰۸؛ ۴۰۷۴). با توجه به علاقه هیدرولوژیست‌ها به استفاده از مدل‌ها و روش‌های تجربی و ساده و کمبود آمار هیدرومتری در اکثر حوزه‌های کوچک و متوسط کشور، توسعه روش‌هایی با ورودی‌های محدود و پارامترهای در دسترس از مواردی است که نیاز به پژوهش در این زمینه را ضروری می‌سازد (آندریو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ مارتیم دمورا^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). در حوزه‌های فاقد آمار هیدرومتری، برای تهیه هیدروگراف واحد مصنوعی می‌توان از روش‌های اشنایدر، نش، کلارک، زمان-مساحت، SCS، هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیک استفاده نمود (مصطفی‌زاده و بهره‌مند، ۱۳۸۸؛ ۱۰؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ ۹۲؛ گونی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ۴۱). به‌کارگیری متغیرها و پارامترهای مختلف ژئومورفیک و فیزیوگرافی در پیش‌بینی واکنش هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز از مواردی است که همواره مورد علاقه محققان در زمینه هیدرولوژی است. در این راستای مدل‌های متعددی ارائه شده است که در آبخیزهای مختلف آزمون شده‌اند. در این راستا، حوزه‌های کوچک و متوسط با داده‌های سیلاب ثبت شده برای آزمون این روش‌ها استفاده می‌شوند. از طرفی نیاز به مقایسه و پیش‌بینی رفتار سیل در آبخیزهای مختلف و عدم وجود آمار مشاهداتی سیلاب در بسیاری از آبخیزهای بالادست بر اهمیت پیش‌بینی سیل‌های در مقیاس‌های زمانی کوتاه تأکید دارد. هدف تحقیق حاضر استفاده از پارامترهای فیزیوگرافی در مدل‌سازی بارش-رواناب و روندیابی جریان سیلاب در آبخیز تمر در استان گلستان است. در این راستا، زیرحوزه‌های آبخیز به‌صورت مخازن خطی در نظر گرفته شده است و از توزیع گاما در مدل‌سازی رواناب استفاده شده است و هیدروگراف سیل در شبکه زهکشی و فواصل اتصال زیرحوزه‌ها با روش هیدرولوژیک ماسکینگام روندیابی شده است. محاسبه پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل‌سازی با تأکید بر روش‌ها و ضرایب تجربی از موارد قابل توجه در این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

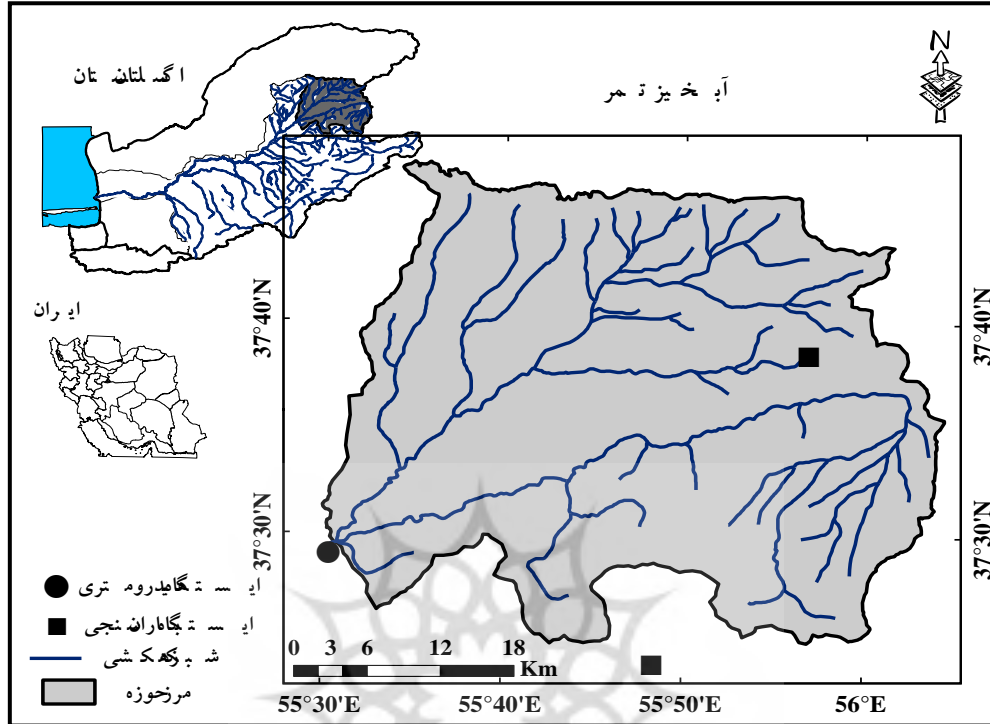
تجزیه و تحلیل‌های این پژوهش در آبخیز تمر در شرق استان گلستان با مساحتی در حدود ۱۵۱۵ کیلومترمربع صورت گرفته است. آبخیز مورد مطالعه در شرق استان گلستان و در محدوده‌ی جغرافیایی ۳۰° ۵۵' تا ۵۶° ۰۵' طول شرقی و ۲۵° ۳۷' تا ۳۷° ۴۸' عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). دمای متوسط منطقه بر اساس آمار ۳۴ ساله ایستگاه‌های باران‌سنجی برابر ۱۷/۴۳ درجه سانتی‌گراد و بارش متوسط آن ۴۹۵ میلی‌متر است (روشنی و همکاران، ۱۳۹۹؛ ۱۹۱). ارتفاع حداقل و حداکثر در منطقه به‌ترتیب ۱۴۱ و ۲۰۰۰ متر از سطح دریا است. کاربری عمده منطقه را به‌ترتیب اراضی مرتعی، دیم و جنگلی به خود اختصاص داده است (مهندسین مشاور کنکاش عمران، ۱۳۸۷؛ معماریان و همکاران، ۱۳۹۷). دلیل انتخاب منطقه مورد مطالعه، وجود داده‌های در دسترس بارش-رواناب ساعتی همزمان بوده است. در این پژوهش داده‌های دبی ساعتی ایستگاه هیدرومتری تمر واقع در خروجی آبخیز و نیز داده‌های باران‌نگار ایستگاه‌های گلیداغ و پارک ملی گلستان

¹ - Hellweger and Maidment

² - Andrieu

³ - Martim de-Moura

واقع در منطقه مورد مطالعه از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان اخذ و استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است. مشخصات رخدادهای بارش و سیلاب همزمان مشاهداتی در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان گلستان

جدول ۱: مشخصات و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد استفاده در تجزیه و تحلیل

ردیف	نام ایستگاه	کد	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	نوع ایستگاه
۱	تمر	۰۰۵-۱۲	۵۵-۳۰	۳۷-۲۹	۱۳۲	هیدرومتری
۲	کلیداغ	۱۳۰-۱۱	۵۶-۰۰	۳۷-۳۹	۱۰۰۰	باران‌سنجی (ثبات)
۳	پارک ملی گلستان	۲۲۱-۱۲	۵۵-۴۸	۳۷-۲۴	۴۶۰	باران‌سنجی (ثبات)

جدول ۲: برخی از مشخصات رویدادهای بارش انتخابی از ایستگاه باران‌نگار گلیداغ و پارک ملی گلستان

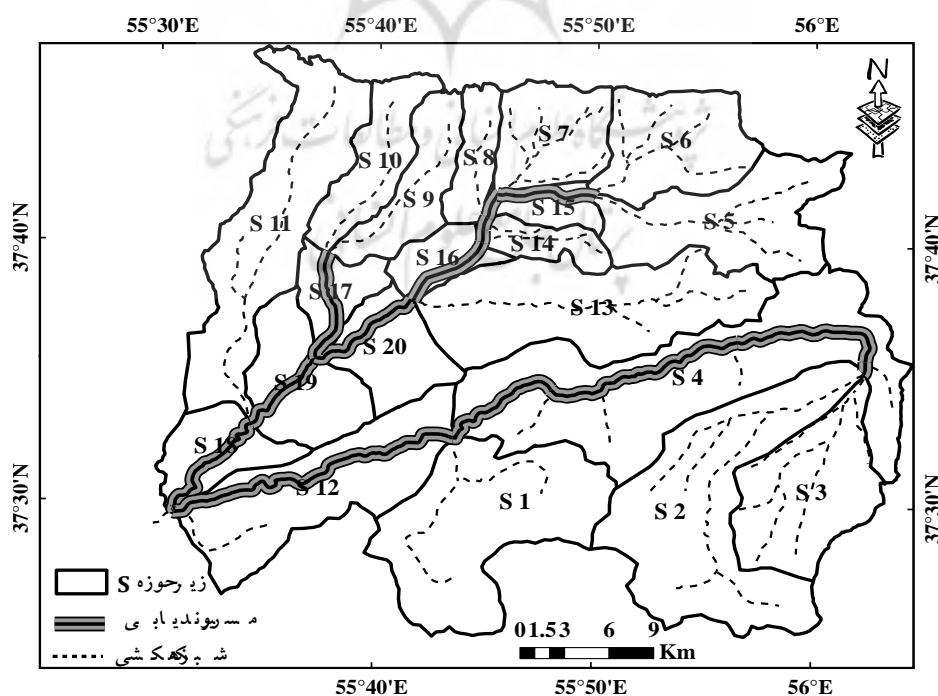
ردیف	تاریخ رویداد	مدت بارش موثر (ساعت)	میزان بارش (میلی‌متر)	متوسط تلفات (میلی‌متر در ساعت)
۱	۱۳۸۵/۰۷/۰۶	۲	۵/۱۳	۴/۵۳
۲	۱۳۸۵/۰۸/۰۶	۳	۱۱/۲۹	۳/۷۰
۳	۱۳۸۵/۰۸/۱۷	۴	۲۱/۰۲	۳/۰۲
۴	۱۳۸۵/۱۲/۱۹	۳	۰/۳۳	۰/۲۲
۵	۱۳۸۵/۱۲/۲۵	۶	۱۲/۲۰	۱/۳۳
۶	۱۳۸۶/۰۱/۰۷	۷	۷/۳۱	۱/۲۶
۷	۱۳۸۶/۰۱/۰۹	۱۲	۱۱/۹۳	۱/۲۱
۸	۱۳۸۶/۰۱/۱۴	۴	۱۲/۴۲	۱/۶۷

جدول ۳: برخی از مشخصات وقایع سیل انتخابی ایستگاه هیدرومتری تمر

ردیف	تاریخ رویداد	دبی اوج (مترمکعب در ثانیه)	حجم سیلاب (هزار مترمکعب)	مدت تداوم (ساعت)	زمان تا اوج (ساعت)
۱	۱۳۸۵/۰۷/۷ و ۶	۹/۵۰	۲۹۱	۲۶	۹
۲	۱۳۸۵/۰۸/۷ و ۶	۷۳/۳۷	۱۳۲۳	۱۳	۷
۳	۱۳۸۵/۰۸/۱۸ و ۱۷	۵۵/۳	۱۰۸۹	۱۹	۱۲
۴	۱۳۸۵/۱۲/۲۰ و ۱۹	۱/۲	۳۸	۱۹	۹
۵	۱۳۸۵/۱۲/۲۶ و ۲۵	۸/۱	۲۷۷	۲۱	۱۳
۶	۱۳۸۶/۰۱/۸ و ۷	۶/۸	۲۰۱	۲۴	۱۱
۷	۱۳۸۶/۰۱/۱۰ و ۹	۶/۲	۲۱۵	۲۱	۱۴
۸	۱۳۸۶/۰۱/۱۵ و ۱۴	۸/۱	۲۰۸	۱۵	۷

روش پژوهش

یکی از موارد قابل توجه در پژوهش حاضر استفاده از روش‌های تجربی در تعیین پارامترهای مورد نیاز مدل‌سازی و روندیابی جریان است که با استفاده از ویژگی‌های فیزیوگرافی مانند مساحت زیرحوزه‌ها، طول رودخانه اصلی در زیرحوزه‌ها، شیب زیرحوزه‌ها، ویژگی‌های مربوط به نگهداشت سطحی، زیرحوزه‌بندی و اتصال شبکه زهکشی استخراج شده است. با استفاده از بررسی شبکه سه ضلعی منظم^۱ و به کمک شبکه آبراهه‌ها، منطقه مورد مطالعه به زیرحوزه‌هایی تقسیم و مرز آن‌ها مشخص شد. محل اتصال زیرحوزه‌ها و بازه‌های روندیابی برای روندیابی جریان سیل مشخص می‌شوند (هلوگر و میدمنت، ۱۹۹۹: ۱۵؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۸۳۲). زیرحوزه‌بندی و موقعیت واحدهای هیدرولوژیک منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: زیرحوزه‌بندی آبخیز تمر و موقعیت بازه‌های روندیابی جریان در حوزه

^۱ - Triangle Irregular Network

از آن‌جا که در توزیع دو پارامتری گاما مخزن به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود، می‌توان مقدار ضریب ذخیره این مخزن را با استفاده از خصوصیات آبخیز برآورد نمود (نجفی، ۱۳۸۱؛ لویز و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۳۵). در این راستا داده‌های مورد نیاز برای تعیین پارامترهای مورد استفاده در توزیع گاما در شبیه‌سازی سیلاب استخراج شد و با استفاده از دو روش تجربی (رابطه ۱ و ۲) به ترتیب مقادیر تعداد مخازن در هر زیرحوزه n و ضریب ذخیره k مشخص شد (بهره‌مند و مصطفی‌زاده، ۱۳۸۹؛ داس^۱، ۲۰۰۴).

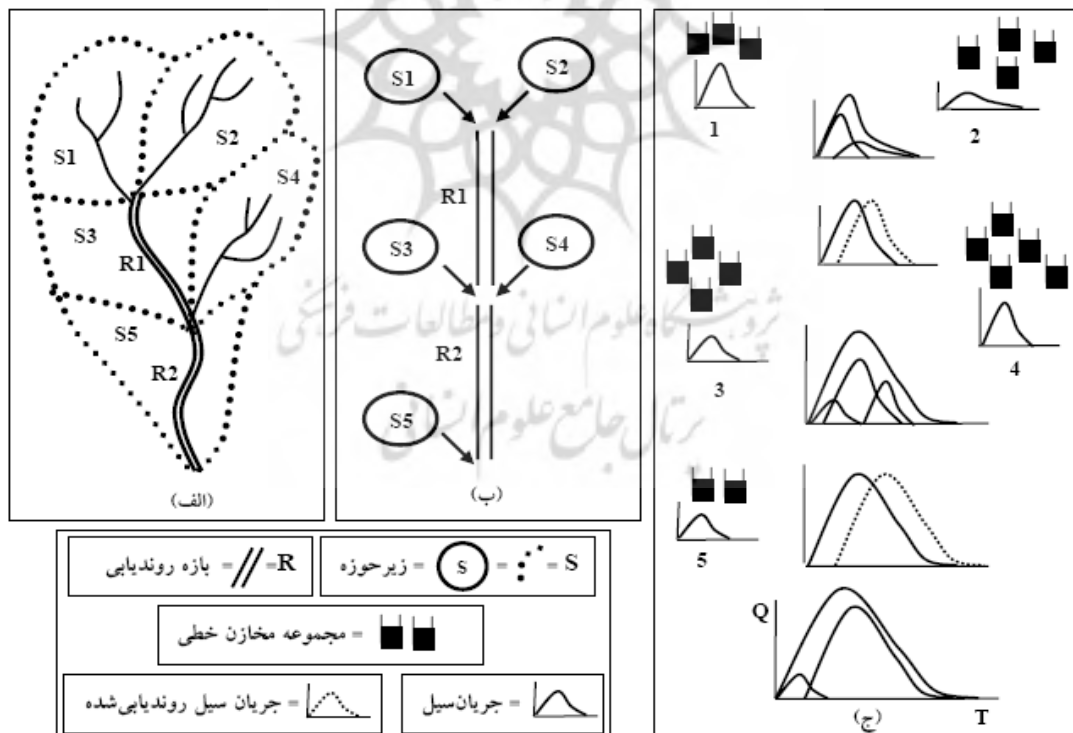
$$n = L/0.41 \quad (۱)$$

$$k = \left(20L^{0.3} \times EA^{-0.33}\right)/n \quad (۲)$$

که در آن، L طول آبراهه اصلی (کیلومتر)، و EA متوسط شیب است. سپس با استفاده از توزیع گاما (رابطه ۳)، جریان سیل در هر زیرحوزه شبیه‌سازی شد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۵؛ لی و همکاران، ۲۰۰۸).

$$u(t) = \frac{e^{-\frac{t}{k}}}{k\Gamma(n)} \left[\frac{t}{k}\right]^{n-1} \quad (۳)$$

در مرحله بعد به کمک روش ماسکینگام، هیدروگراف سیل از خروجی هر زیرحوزه تا محل اتصال بعدی، روندیابی شد (اورتون^۲، ۱۹۶۶؛ لینزلی^۳ و همکاران، ۱۹۸۵). نمایش حوزه و مراحل شبیه‌سازی به صورت شماتیک در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳: شماتیک آبخیز فرضی (الف) جغرافیایی (ب) هیدرولوژیکی (ج) ترکیب و روندیابی جریان در پژوهش حاضر

1 - Das
2 - Overton
3 - Linsley

به‌منظور پیش‌بینی چگونگی طغیان و فروکش سیل هیدروگراف رودخانه در یک منطقه مشخص و تعیین میزان تغییر سیل در حین عبور از یک بازه یا کانال، روند یابی سیل دارای اهمیت زیادی است. انتخاب نوع روش در روندیابی سیل به ماهیت مسئله و داده‌های موجود بستگی دارد، در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژی بیشتر از روش‌های ساده هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (لینزلی و همکاران، ۱۹۸۵). در روش ماسکینگام تغییرات ذخیره در یک بازه، بین دو زمان t_1 و t_2 ، در مقطع زمانی Δt ، با رابطه ۴ بیان می‌شود.

$$S_{t_2} - S_{t_1} = K \{ [XI_{t_2} + (1-X)Q_{t_2}] - [XI_{t_1} + (1-X)Q_{t_1}] \} \quad (۴)$$

از طرفی با توجه به رابطه پیوستگی (رابطه ۵)، مقدار دبی در نقطه خروجی با رابطه ۶ بیان می‌شود.

$$S_{t_2} - S_{t_1} = (I_1 + I_2/2)\Delta t - (Q_1 + Q_2/2)\Delta t \quad (۵)$$

$$Q_{t_2} = C_0 I_{t_2} + C_1 I_{t_1} + C_2 Q_{t_1} \quad (۶)$$

که در آن ضرایب C_0 ، C_1 و C_2 با استفاده از روابط ۷ تا ۹ محاسبه می‌شود.

$$C_0 = (-KX + 0.5\Delta t) / (K - KX + 0.5\Delta t) \quad (۷)$$

$$C_1 = (KX + 0.5\Delta t) / (K - KX + 0.5\Delta t) \quad (۸)$$

$$C_2 = (K - KX - 0.5\Delta t) / (K - KX + 0.5\Delta t) \quad (۹)$$

که در آن، مقادیر K و X ضرایب روش ماسکینگام بوده و برای یک بازه ثابت در نظر گرفته می‌شوند. در رودخانه‌های طبیعی و در صورت عدم وجود داده‌های مشاهداتی، مقدار عددی پارامتر X از صفر تا ۰/۳ متغیر بوده و معمولاً مقدار آن را برابر ۰/۲ در نظر می‌گیرند (چو^۱ و همکاران، ۱۹۸۸). مقدار عددی پارامتر K برابر زمان عبور موج سیل در یک کانال بوده و در این پژوهش از روش تجربی (رابطه ۱۰) برای محاسبه آن استفاده شد (صادقی و دهقانی، ۱۳۸۵).

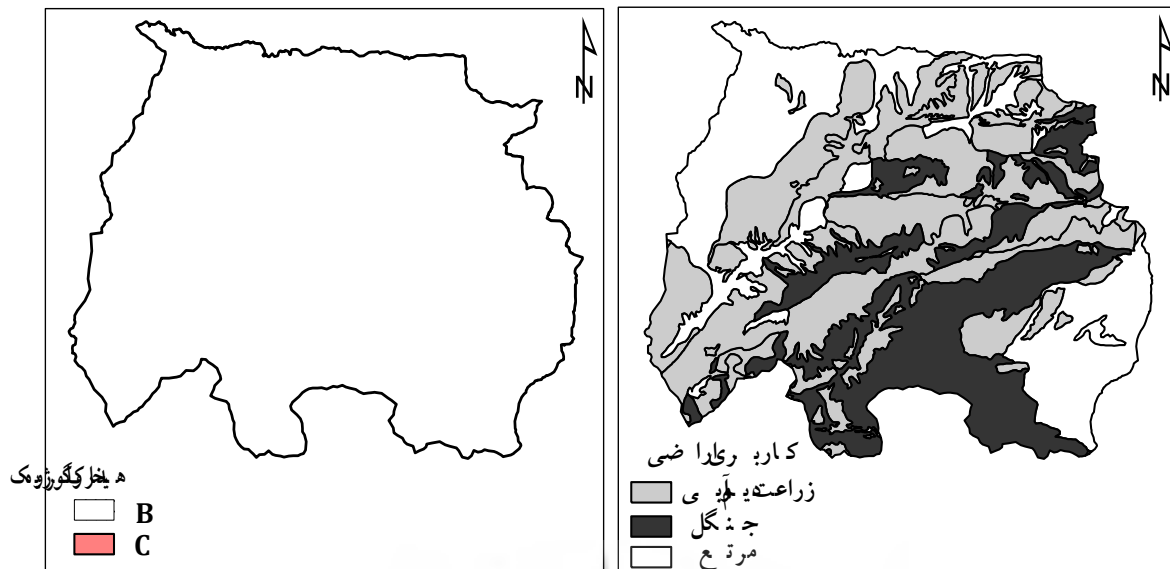
$$K = CL / \sqrt{S} \quad (۱۰)$$

که در آن، K ضریب ذخیره (ساعت)، C ضریب تجربی (۰/۴-۰/۵)، L طول رودخانه اصلی (کیلومتر) و S شیب متوسط رودخانه است. بازه مناسب زمانی روندیابی رودخانه نیز برابر نیم ساعت فرض شده است.

سپس با در نظر گرفتن موقعیت زیرحوزه‌ها و بازه‌های روندیابی، هیدروگراف واحد لحظه‌ای سیلاب برای کل حوزه برآورد و به هیدروگراف واحد برابر یک سوم تا یک پنجم زمان تاخیر حوزه تبدیل شد. برای محاسبه زمان تاخیر، روش SCS (رابطه ۱۱) مورد استفاده قرار گرفت (علیزاده، ۱۳۹۴؛ مهندسین ارتش آمریکا، ۲۰۰۱).

$$t_{lag} = L^{0.8} (S+1)^{0.7} / 1900(Y)^{0.5} \quad (۱۱)$$

که در آن، t_{lag} زمان تاخیر (ساعت)، L طول آبراهه اصلی (فوت)، S نمایه نگهداشت آب (اینچ) که از شماره منحنی بدست می‌آید و Y شیب متوسط حوزه (درصد) هستند (۱). به این منظور مقادیر شماره منحنی از نقشه کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیکی و شرایط رطوبت پیشین خاک استخراج شد و مقدار آن به‌صورت وزنی برابر ۶۹ به دست آمد (شکل ۴).



شکل ۴: نقشه کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیک خاک آبخیز تمر

سپس با استفاده از آن و رابطه SCS مقدار زمان تاخیر برابر ۱۱/۸ ساعت محاسبه شد و در نتیجه هیدروگراف با تداوم بارش ۴ ساعته استخراج شد (نوربخش و همکاران، ۲۰۰۵). در مرحله بعد با ضرب کردن ابعاد هیدروگراف حاصل در ضربان‌های بارش موثر، هیدروگراف سیلاب برای هر رگبار مدل‌سازی شد (سارنگی^۱ و همکاران، ۲۰۰۷). بر اساس داده‌های موجود و تناسب آن‌ها، تعداد هشت واقعه مشاهداتی سیل و بارش متناظر انتخاب شد. در انتخاب هیتوگراف‌ها و هیدروگراف‌های همزمان، سعی شد بارش‌های منفرد و مجزا و نیز مولد رواناب سطحی با توزیع زمانی یکنواخت بارش در طول رگبار برای تحلیل‌ها استفاده شوند. علاوه بر این، در هیدروگراف‌های انتخاب شده، کامل بودن هیدروگراف‌ها و نیز تک‌اوجه بودن و کوتاه بودن مدت بارش مؤثر در نظر گرفته شده است. تعیین بارش مؤثر به‌عنوان ورودی پویای مدل هیدرولوژیک ضروری است. برای مشخص نمودن بارش مؤثر از روش درصد رواناب که به واقعیت نزدیک‌تر بوده و ساده‌تر است، استفاده شد (احمد^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). برای تفکیک دبی پایه از هیدروگراف‌های جریان روش فیلتر عددی برگشتی^۳ (رابطه ۱۲) استفاده شد (اکسوی^۴ و همکاران، ۲۰۰۹).

$$q_t = \alpha q_{t-1} + (1 + \alpha/2)(Q_t - Q_{t-1}) \quad (12)$$

که در آن، q جریان فیلتر شده، Q کل جریان هیدروگراف و α پارامتر فیلتر است که مقدار آن در دامنه عددی ۰/۹۵ تا ۰/۹۰ متغیر بوده و بهترین مقدار آن بر اساس مطالعات انجام شده برابر ۰/۹۲۵ گزارش شده است (مهری و همکاران، ۱۳۹۸؛ اکسوی و همکاران، ۲۰۰۹).

به‌منظور ارزیابی نتایج مدل در مقایسه با دبی‌های مشاهداتی موجود، معمولاً از معیارهای ارزیابی استفاده می‌شود که بسیاری از آن‌ها در واقع مجموع خطاهای شبیه‌سازی در بازه زمانی جریان است (کراوس^۵ و همکاران، ۲۰۰۵). در این پژوهش

1 - Sarangi

2 - Ahmad

3 - Recursive Digital Filter

4 - Aksoy

5 - Krause

تناسب نتایج شبیه‌سازی با معیارهای ضریب تبیین^۱ (رابطه ۱۳)، ضریب کارایی نسبی (رابطه ۱۴)، شاخص توافق^۲ (رابطه ۱۵)، و شاخص توافق نسبی (رابطه ۱۶)، مورد ارزیابی قرار گرفت (موریاسی، ۲۰۰۷؛ آیله و همکاران، ۲۰۱۷).

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (13)$$

$$E_{rel} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\bar{O}} \right)^2} \quad (14)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}| \right)^2} \quad (15)$$

$$d_{rel} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|}{\bar{O}} \right)^2} \quad (16)$$

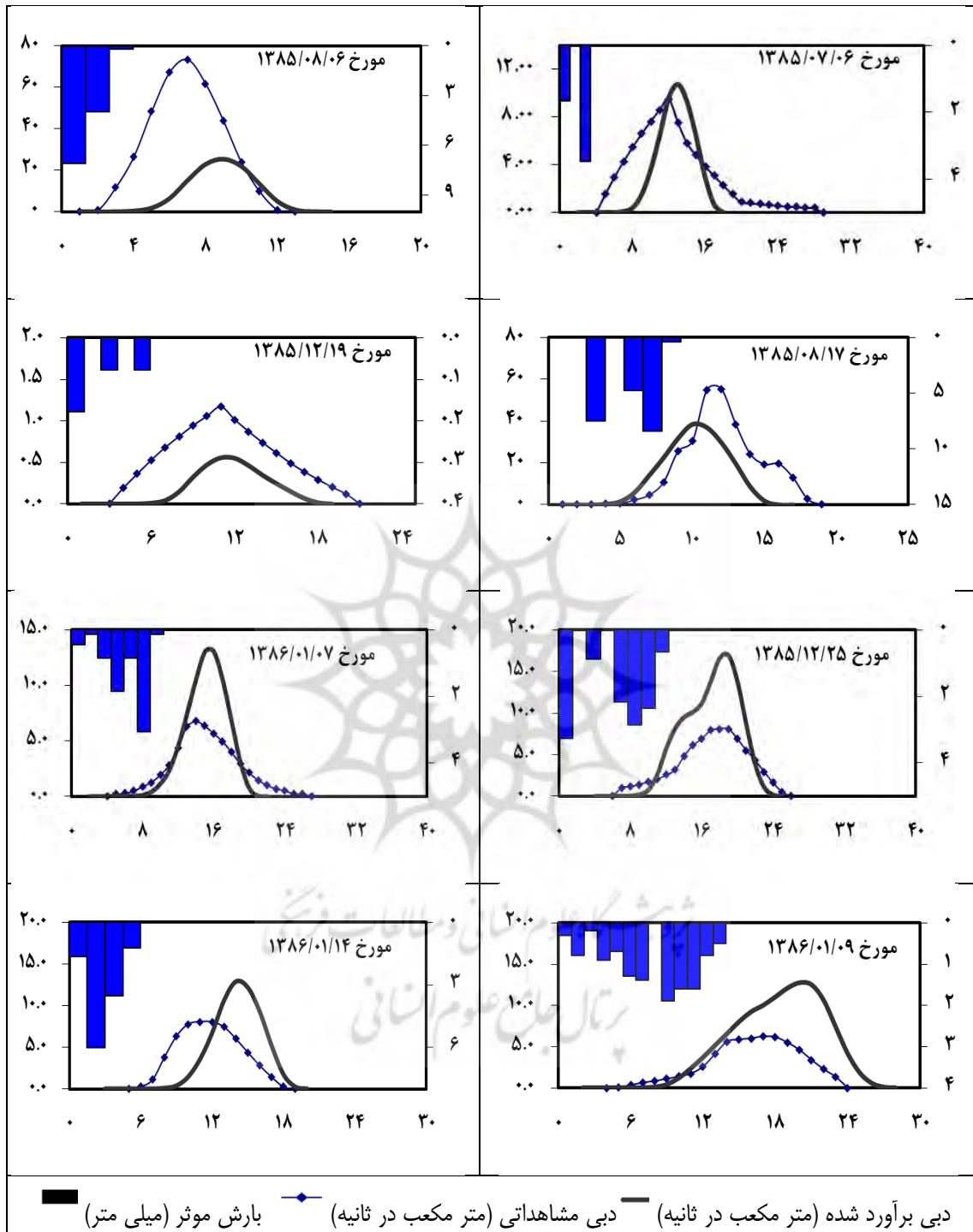
که در آن، که در آن، O_i و P_i مقادیر دبی برآوردی و مشاهداتی، \bar{O} و \bar{P} میانگین مقادیر دبی برآوردی و مشاهداتی هستند و n تعداد مشاهدات است. در تمامی معیارهای ارزیابی نتایج، مقدار یک نشان دهنده تطابق کامل هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است.

یافته‌ها و بحث

بر اساس روش پژوهش، مقادیر پارامترهای توزیع گاما با استفاده از روابط ۱ و ۲ در هر زیرحوزه محاسبه شد و بر اساس مراحل ارائه شده در شکل ۳، هیدروگراف جریان در هر زیرحوزه برآورد شد. سپس مقادیر ضرایب روش ماسکینگام در هر بازه روندیابی بدست آمد و با استفاده از (روابط ۴ تا ۱۰)، جریان سیل در آبراهه‌های اصلی شبکه زهکشی روندیابی شد. بر اساس شماره منحنی اختصاص یافته برابر ۶۹ و نتایج محاسبه زمان تاخیر برابر ۱۱/۸ ساعت، هیدروگراف واحد ۴ ساعته آبخیز تمر برآورد شد. مقدار عددی زمان تاخیر بر اساس رابطه SCS در محاسبه زمان تاخیر بوده است و دلیل انتخاب مدت ۴ ساعت برای هیدروگراف واحد، برابری زمان هیدروگراف واحد با مقدار زمان تمرکز حوزه بوده است. سپس با در نظر گرفتن پراکنش زمانی و میزان بارش موثر، جریان سیل در هشت رگبار برآورد شد که نتایج در شکل ۵ ارائه شده است.

¹ - Coefficient of determination

² - Index of agreement



شکل ۵: خصوصیات وقایع سیلاب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در آبخیز تمر، (محورهای سمت راست بارش بر حسب میلی‌متر، محورهای سمت چپ دبی بر حسب مترمکعب در ثانیه و محور افقی زمان بر حسب ساعت)

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۵، در برخی از رخدادها شبیه‌سازی‌ها کمتر از مقدار واقعی و در برخی موارد بیش‌تر از مقدار واقعی بوده است، که این تفاوت را می‌توان به روش تفکیک دبی پایه و نیز تعیین بارش موثر نسبت داد. از طرفی، تفاوت در مولفه‌های زمانی شبیه‌سازی را می‌توان با نتایج روندیابی جریان مرتبط دانست که ناشی از تاخیر یا تقدم موج

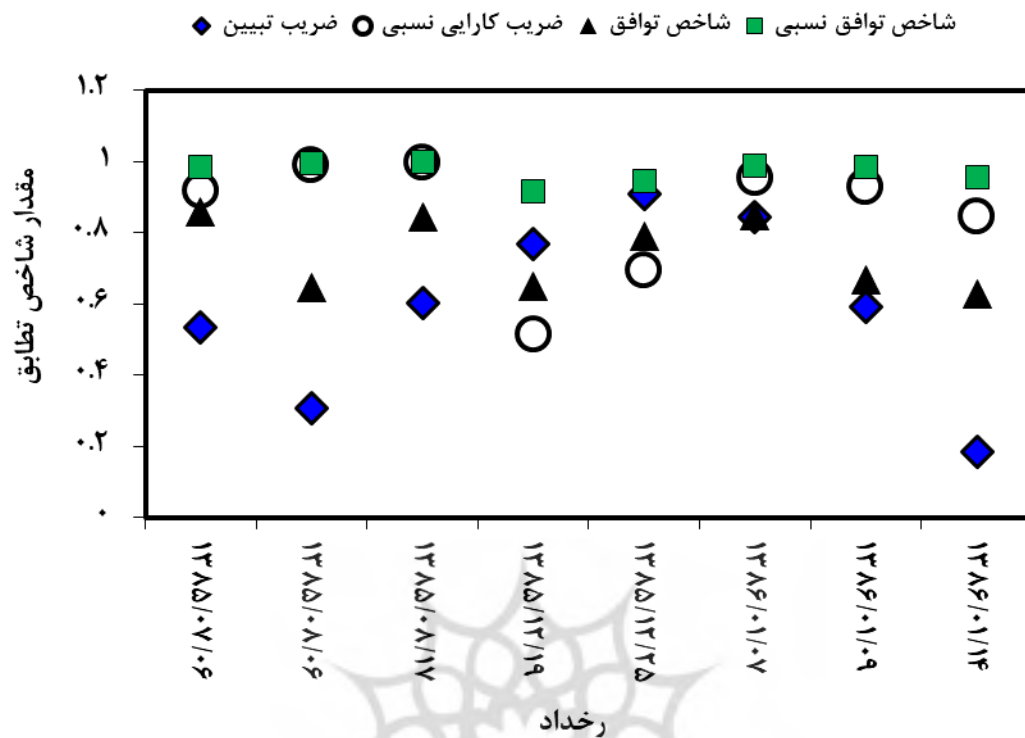
سیل در حین عبور از آبراهه‌های اصلی زیرحوزه‌ها بوده است. در مجموع مدل در رگبارهایی با بارش موثر بیش‌تر بهتر توانسته است که جریان سیل را پیش‌بینی نماید.

در جدول ۴، مقادیر مولفه‌های رویدادهای سیلاب برآوردی و مشاهداتی در آبخیز تمر بر اساس روش مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۴: مقادیر مولفه‌های هیدروگراف‌های برآوردی و مشاهداتی آبخیز تمر

تاریخ رویداد	مرحله	دبی اوج (مترمکعب در ثانیه)	حجم سیلاب (هزار مترمکعب)	مدت تداوم (ساعت)	زمان تا اوج (ساعت)
۱۳۸۵/۰۷/۷ و ۶	مشاهداتی	۹/۵۰	۲۹۱	۲۶	۹
	برآوردی	۱۰/۷۴	۱۸۶	۱۵	۱۰
۱۳۸۵/۰۸/۷ و ۶	مشاهداتی	۷۳/۳۷	۱۳۲۳	۱۳	۷
	برآوردی	۲۵/۴۵	۴۰۹	۱۵	۹
۱۳۸۵/۰۸/۱۸ و ۱۷	مشاهداتی	۵۵/۳	۱۰۸۹	۱۹	۱۲
	برآوردی	۳۸/۳۳	۷۶۲	۱۷	۱۰
۱۳۸۵/۱۲/۲۰ و ۱۹	مشاهداتی	۱/۲	۳۸	۱۹	۹
	برآوردی	۰/۵۵	۱۲	۱۷	۹
۱۳۸۵/۱۲/۲۶ و ۲۵	مشاهداتی	۸/۱	۲۷۷	۲۱	۱۳
	برآوردی	۱۶/۹۲	۴۴۲	۲۰	۱۴
۱۳۸۶/۰۱/۸ و ۷	مشاهداتی	۶/۸	۲۰۱	۲۴	۱۱
	برآوردی	۱۳/۰۲	۲۶۵	۱۹	۱۲
۱۳۸۶/۰۱/۱۰ و ۹	مشاهداتی	۶/۲	۲۱۵	۲۱	۱۴
	برآوردی	۱۲/۷۵	۴۳۲	۲۵	۱۷
۱۳۸۶/۰۱/۱۵ و ۱۴	مشاهداتی	۸/۱	۲۰۸	۱۵	۷
	برآوردی	۱۲/۹	۲۳۲	۱۶	۱۰

بر اساس نتایج ارائه شده و مقایسه ظاهری هیدروگراف‌ها در شکل ۵، می‌توان بیان نمود که نتایج مدل در برآورد مولفه‌های هیدروگراف سیل دارای دقت نسبتاً قابل قبولی است. البته با توجه به استفاده از روش‌ها و ضرایب تجربی در تخمین ورودی‌های فرایند مدل‌سازی، وجود خطا در نتایج مدل تا حد زیادی قابل انتظار است. مقدار متوسط عددی ضریب تبیین، بیانگر پراکنش سری داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به میزان ۶۰٪ است و میزان شاخص توافق برابر ۷۴٪ است. در معیارهای کارایی نسبی و شاخص توافق نسبی به ترتیب با مقادیر ۸۶٪ و ۹۷٪ مشخص است که تقریباً در اکثر رویدادها تطابق بیش‌تری در مورد دبی‌های کم در شاخه‌های نزولی و صعودی هیدروگراف‌ها وجود دارد (شکل ۵). در شکل ۶، مقادیر معیارهای مختلف در ارزیابی نتایج مدل‌سازی سیلاب ارائه شده است.



شکل ۶: مقادیر معیارهای کارایی در رویدادهای برآورد شده در مقایسه با رویدادهای مشاهداتی

بر اساس مقادیر ضریب تبیین (۶۰٪) و شاخص توافق (۷۴٪)، که دارای دقت بیشتری در کمی نمودن مقادیر خطا هستند، می‌توان گفت که نتایج مدل در برآورد شکل کامل هیدروگراف در حد قابل قبول است. شاخص توافق بیان‌کننده نسبت میانگین مربعات خطا و حداکثر مربعات خطایی است که هر جفت داده می‌تواند داشته باشد. البته به گفته ویلموت (۱۹۸۴)، مقدار شاخص توافق حتی در نتایج ضعیف مدل‌سازی هم بیش‌تر از ۰/۶۵ خواهد بود. در بسیاری از معیارهای کارایی مقادیر مطلق اختلافات مورد توجه قرار می‌گیرد و وزن بیش‌تری به خطا در برآورد دبی‌های بالا اختصاص می‌یابد، در حالی که در معیارهای کارایی نسبی (۸۶٪) و شاخص توافق نسبی (۹۷٪)، خطای برآورد در دبی‌های پایین نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی سیلاب و تعیین روند عبور آن از شبکه زهکشی آبخیز تمر انجام شده است (شکل ۳)، که در آن پارامترهای مورد نیاز با استفاده از روشهای تجربی از خصوصیات آبخیز استخراج شده است. بر اساس نتایج جدول ۴ و معیارهای ارزیابی نتایج، روش ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش دارای خطای مدل‌سازی سیلاب دارای کارایی نسبتاً مناسبی است. استفاده از معیارهای مختلف در ارزیابی نتایج امکان قضاوت بهتر در مورد عملکرد مدل را فراهم می‌نماید (کراوس و همکاران، ۲۰۰۵). لازم به ذکر است که استفاده از روش‌ها و ضرایب تجربی در تخمین بخش عمده‌ای از ورودی‌های مورد نیاز فرایند شبیه‌سازی و روندیابی جریان، احتمال وجود و در نتیجه تجمع و انتشار خطا^۱ در نتایج مدل را تشدید می‌نماید که در این خصوص بونیا و همکاران (۲۰۰۷) نیز به منابع انتشار خطا در مدل‌سازی دبی سیلاب ساعتی اشاره نموده‌اند. به عبارتی نتایج مدل‌سازی سیلاب تحت تاثیر مقادیر پارامترهایی است که در محاسبه آن‌ها عدم قطعیت

^۱ - Error propagation

وجود دارد که نتایج لوپز و همکاران (۲۰۰۵)، در خصوص تاثیر خطای برآورد در پارامترهای ورودی بر نتایج شبیه‌سازی جریان را تأیید می‌نماید. منابع بروز خطای مدل مذکور را می‌توان به استفاده از روابط تجربی در برآورد پارامترها نسبت داد. از طرفی بخشی از خطای موجود به روندیابی جریان توسط روش ماسکینگام است که بر اساس ضرایب معمول روش انجام شده است. علاوه بر این، ممکن است تعیین جزئی‌تر زیرحوزه‌ها نتایج بهتری ارائه دهد. باید اشاره نمود که برای برآورد تمامی پارامترهایی که در این پژوهش به صورت تجربی بدست آمده اند، روش‌هایی وجود دارد که از داده‌های مشاهداتی هیدروگراف جریان استفاده می‌نماید که طبیعتاً دارای دقت بیشتری بوده و به نتایج بهتری در مدل‌سازی سیلاب منجر خواهد شد ولی از موارد قابل توجه در این پژوهش عدم استفاده از روش‌های متکی به داده‌های مشاهداتی رواناب است. به عبارتی سعی شده است که در مدل توسعه داده شده از روابط ساده و نیز متغیرهای سهل‌الوصول استفاده شود که در مناطق فاقد آمار کاربرد داشته باشد. در این راستا پورحاجی‌زاده و همکاران (۱۳۸۸)، لوپز و همکاران (۲۰۰۵)، آگیر و همکاران (۲۰۰۵)، سینک و همکاران (۲۶)، از داده‌های مشاهداتی رواناب در برآورد پارامترهای مورد نیاز مدل‌سازی استفاده نموده اند و بر این اساس به نتایجی با دقت بالاتر از نتایج این پژوهش دست یافته اند که از نظر روش‌های مورد استفاده در محاسبه پارامترهای ورودی مدل‌سازی هیدرولوژیک با این پژوهش دارای اختلاف هستند. از دیگر موارد قابل ذکر در این مطالعه دخالت دادن روندیابی جریان در آبراهه‌های واقع در میان زیرحوزه‌ها است که باعث افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی جریان شده است. باید اشاره شود که دامنه اعداد و ضرایب روش ماسکینگام متغیر است و در صورت برآورد دقیق ضرایب بهبود نتایج را در پی خواهد داشت. با توجه به وجود روش‌های تجربی و خصوصیات متعدد مورد استفاده آبخیز در این پژوهش، بهبود نتایج شبیه‌سازی نیازمند آنالیز حساسیت نتایج به دامنه‌ای از مقادیر پارامترها و ضرایب خواهد بود که با نتایج سینک و همکاران (۲۰۰۷)، و لی و همکاران (۲۰۰۸)، همسو است. به طور کلی نتایج بدست آمده در ارتباط با امکان شبیه‌سازی هیدروگراف با استفاده از متغیرهای فیزیکی و خصوصیات و پارامترهای فیزیوگرافی سهل‌الوصول آبخیز، یافته‌های بسیاری از پژوهش‌های گذشته (برای مثال، لیو و همکاران (۲۰۰۹)، آگیر و همکاران (۲۰۰۵)، پورحاجی‌زاده و همکاران (۱۳۸۸)، لوپز و همکاران (۲۰۰۵)، هلوگر و میدمنت (۱۳)، را تأیید می‌نماید. باید اشاره شود که در پژوهش‌های قبلی از روش‌های متفاوتی در تبدیل بارش به رواناب و نیز روندیابی جریان استفاده شده است. هم‌چنین با توجه به اینکه داده‌های بارش در تعداد زیادی از حوزه‌ها در دسترس است، می‌توان با استفاده از هیتوگراف بارش در بازه‌های زمانی مناسب به عنوان ورودی مدل، هیدروگراف سیلاب را به دست آورد. با در نظر گرفتن سطح خطای مورد انتظار از نتایج مدل‌سازی، روش مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند در اولویت‌بندی زیرحوزه‌های یک حوزه از نظر سیل‌خیزی و تولید رواناب مورد استفاده قرار گیرد. باید اشاره شود که مدل‌سازی هیدروگراف کامل و نیز استخراج مولفه‌های دبی اوج، زمان تا اوج و حجم سیلاب در مقیاس رگبار از مزیت‌های روش پیشنهادی است. به عبارتی علاوه بر امکان مقایسه زیرحوزه‌ها از نظر بروز سیل، می‌توان شکل هیدروگراف و روند تغییر آن را در بخش‌های مختلف اتصال رودخانه‌ها و نیز شبکه زهکشی مورد مطالعه قرار داد. بررسی تاثیر روش‌های مختلف برآورد پارامترهای ورودی مدل‌سازی، انجام پژوهش‌های بیشتر در آبخیزهایی با خصوصیات مختلف، استفاده از سایر توزیع‌های متداول و روش‌های روندیابی رودخانه از مواردی است که انجام آن در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع

- بهره‌مند، ع. و مصطفی‌زاده، ر. ۱۳۸۹. مقایسه کارایی روش‌های تخمین پارامترهای مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای نش در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان. پژوهش‌های آبخیزداری، ۸۶: ۵۱-۴۲.
- پورحاجی‌زاده، ا. محسنی ساروی، م. و وروانی، ج. ۱۳۸۸. بررسی رابطه پارامترهای هیدروگراف واحد لحظه‌ای ناش با ویژگی‌های جریان و خصوصیات فیزیوگرافی در چند حوزه آبخیز کشور. مجله پژوهش و سازندگی، ۲۲(۲):

۲۹-۲۱.

- روشنی، ح.، مصطفی‌زاده، ر.، اسمعیلی، ا. ذبیحی، م. ۱۳۹۹. تغییرات مکانی و زمانی الگوی وقوع بارش با استفاده از شاخص‌های *PCI* و *SI* در استان گلستان. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۷(۴): ۲۰۴-۱۸۷.
- سالاری جزی، م. ادیب، آ. محمودیان شوشتری، م. و آخوندعلی، ع.م. ۱۳۸۷. ارزیابی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی بر مبنای روش ناش در حوضه های بدون آمار بارندگی. پنجمین همایش ملی آبخیزداری. گرگان. ۲۲۸-۲۳۷.
- صادقی، س.ح.ر.، و دهقانی، م. ۱۳۸۵. دقت روش های تخمین ضریب ذخیره آبنمود واحد لحظه ای در بازسازی آبنمود واحد سیل. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳(۳): ۱۶۰-۱۵۲.
- علیزاده، ا. ۱۳۷۷. اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ دهم. انتشارات دانشگاه امام‌رضا (ع) مشهد. ۶۳۴ ص.
- مصطفی‌زاده، ر.، بهره‌مند، ع. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از مدل مخزن خطی ناش در آبخیز جعفرآباد استان گلستان. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۳(۶): ۱۶-۹.
- مصطفی‌زاده، ر.، میرزایی، ش.، اسمعیلی‌عوری، ا.، ذبیحی، م. ۱۳۹۷. آنالیز حساسیت مولفه‌های هیدروگراف جریان به تغییر در پارامترهای روش زمان-مساحت کلارک در آبخیز محمدآباد استان گلستان. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۹(۱): ۹۱-۹۹.
- معماریان، ه.، پوررضا بیلندی، م.، کومه، ز. ۱۳۹۷. بهینه‌سازی پارامترهای مدل *KINEROS2* با استفاده از الگوریتم *PSO* برای شبیه‌سازی رخداد سیلاب (مطالعه موردی: حوزه تهر استان گلستان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۹(۱۸): ۹۱-۱۱۰.
- مهری، س.، مصطفی‌زاده، ر.، اسمعیلی‌عوری، ا.، قربانی، ا. ۱۳۹۸. مقایسه روش‌های ترسیمی و فیلترهای عددی برگشتی در تفکیک جریان پایه در تعدادی از رودخانه‌های استان اردبیل. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۶(۴): ۱۱۳-۹۵.
- مهندسین مشاور کنکاش عمران، ۱۳۸۷. گزارش بهنگام‌سازی و تلفیق مطالعات منابع آب حوزه آبریز رودخانه‌های قره‌سو-گرگانرود. مدیریت منابع آب ایران. وزارت نیرو.
- نجفی، م. ر. ۱۳۸۱. ترجمه سیستم‌های هیدرولوژیکی مدل‌سازی بارش-رواناب، وی پی سینگ، انتشارات دانشگاه تهران، دو جلد ۱۰۵۶ صفحه.
- Agirre, U., Goni, M., Lopez, J.J., and Gimena, F.N. 2005. Application of a unit hydrograph based on sub-watershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph. *Catena*. 64:321-332.
- Ahmad, M.M., Ghumman, A.R., and Ahmad, S. 2009. Estimation of Clark's instantaneous unit hydrograph parameters and development of direct surface runoff hydrograph. *Water Resources Management*. DOI 10.1007/s11269-008-9388-8.
- Aksoy, H, Kurt, I., and Eris, E. 2009. Filtered smoothed minima base-flow separation method. *Hydrology*. 372:94-101.
- Andrieu, H., Moussa, R., Kirstetter, P.E. 2021. The Event-specific Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (E-GIUH): The basin hydrological response characteristic of a flood event. *Journal of Hydrology*, 603, Part D, 127157. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127158>.
- Ayele, G.T., Teshale, E.Z., Yu, B., Rutherford, I.D., Jeong, J. 2017. Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the Upper Blue Nile river basin, Ethiopia. *Water* 9(10): 782. <https://doi.org/10.3390/w9100782>
- Bahrami, E., Salarijazi, M., Mohammadrezapour, O., and HaghightatJou, P. 2022. Evaluation of SCS model for flood characteristic prediction in an ungauged catchment

- considering effects of excess rainfall and base flow separation. *Journal of Earth System Science*, 131, Article number: 11.
- Bhunya, P.K., Berndtsson, R. Ojha, C.S.P., and Mishra, S.K. 2007. Suitability of Gamma, Chi-square, Weibull, and Beta distributions as synthetic unit hydrographs. *Hydrology*. 334:28–38.
 - Chow, V.T., Maidment, D.R., and May, L.W. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water resources and Environmental Engineering. 572p.
 - Das, G.H. 2004. *Hydrology and Soil Conservation Engineering*, Prentice-Hall, New Delhi, India 490p.
 - Goñi, M., López, J.J., Gimena, F.N. 2019. Geomorphological instantaneous unit hydrograph model with distributed rainfall. *Catena*, 172: 40-53.
 - Hellweger, F., Maidment, D.R. 1999. Definition and connection of hydrologic elements using geographic data. *Hydrologic Engineering*. ASCE. 4(1):10-18.
 - Jain, V., and Sinha, R. 2003. Derivation of unit hydrograph from GIUH analysis for a Himalayan River. *Water Resources Management*. 17:355–375.
 - Krause, P., Boyle, D.P., and Base, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. 5:89-97.
 - Lhomme, J., Bouvier, C., and Perrin, J.L. 2004. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. *Hydrology*. 299:203–216.
 - Li, Ch., Guo, Sh., Zhang, W., and Zhang, J. 2008. Use of Nash's IUH and DEMs to identify the parameters of an unequal-reservoir cascade IUH model. *Hydrological Process*. 22:4073–4082.
 - Linsley, R.K., Kohler, M.A., and Paulhus, J.L.H. 1985. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. 492p.
 - Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L., and Pfister, L. 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *Hydrology*. 283:91–106.
 - Lopez, J.J., Gimena, F.N., Goni, M., and Agirre, U. 2005. Analysis of a unit hydrograph model based on watershed geomorphology represented as a cascade of reservoirs. *Journal of Agricultural Water Management*. 77: 128–143.
 - Martim de-Moura, M., Beskow, S., Terra, F., Rogério de Mello, C., Almeida da Cunha, Z., Cassalho, F. 2021. Evaluation of geomorphological approaches combined with digital elevation models for the Nash's instantaneous unit hydrograph. *Journal of South American Earth Sciences*, 107: 103153
 - Moriasi, D.N. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885-900.
 - Mostafazadeh, R., Sadoddin, A., Bahremand, A., and Sheikh, V.B, ZareGarizi, A. 2017. Scenario analysis of flood control structures using a multi-criteria decision making technique in Northeast Iran. *Natural Hazards*, 87(3), 1827-1846.
 - Noorbakhsh, M.E., Rahnama, M.B. and Montazeri, S. 2005. Estimation of IUH with Clark's method using GIS techniques. *Applied Sciences*. 5(3):455-458.
 - Ogassawara, J.F., Beskow, S., Dai Prá, M., de Moura, M., Martim de Moura, M., Vargas, M.M Merwade, V.M., and Mello, C.R. 2022. Applicability of geomorphological approaches combined with the modified Clark's model for flood hydrograph estimation. *Catena*, 213: 106200.
 - Overton, D.E. 1966. *Muskingum flood routing of upland stream flow*. Hydrology, North-Holland Publishing Co., Amsterdam. 4:185-200.
 - Rai, R.K., Sarkar, S., and Singh, V. P. 2009. Evaluation of the adequacy of statistical distribution functions for deriving unit hydrograph. *Journal of Water Resources Management*. 23:899–929.
 - Sarangi, A., Madramootoo, C.A., Enright, P., and Prasher, S.O. 2007. Evaluation of three

- unit hydrograph models to predict the surface runoff from a Canadian watershed. Water Resources Management. 21:1127–1143.*
- Shatnawi, A., and Ibrahim, M. 2022. Derivation of flood hydrographs using SCS synthetic unit hydrograph technique for Housha catchment area. *Water Supply (2022) 22 (5): 4888–4901.*
 - Singh. P.K., Bhunya, P.K., Mishra, S.K., and Chaube, U.C. 2007. An extended hybrid model for synthetic unit hydrograph derivation. *Hydrology. 336:347– 360.*
 - US Army Corps of Engineers. 2001. *Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) User Manual.*
 - Wang, W., Zhao, Y., Chau, K., Xu, D., Liu, Ch., 2021. Improved flood forecasting using geomorphic unit hydrograph based on spatially distributed velocity field. *Journal of Hydroinformatics, 23 (4): 724–739. doi: <https://doi.org/10.2166/hydro.2021.135>*
 - Willmot, C.J. 1984. On the evaluation of model performance in physical geography in: *Spatial Statistics and Models. Dordrecht. 443-460.*
 - Yao, C., Li, Zh., Zhang, K., Huang, Y., Wang, J. 2022. Evaluating performance dependency of a geomorphologic instantaneous unit hydrograph-based hydrological model on DEM resolution. *Water Science and Engineering, In press. Bastola, S., <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.04.002>*
 - Yue, S., Taha, B.M.J., Bobee, B., Legendre, P., Bruneau, P., 2002. Approach for describing statistical properties of flood hydrograph. *Hydrologic Engineering. ASCE. 7(2):147–153.*