



برآورد هیدروگراف سیلاب در حوضه‌ی فاقد آمار قره‌سو با مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما

عرفان بهرامی^۱، مهدی دستورانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای مهندسی منابع آب، علوم و مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه بیرجند
 ۲- استادیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه بیرجند

تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶

وصول مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۸

چکیده

برآورد هیدروگراف سیلاب در حوضه‌های فاقد آمار یک موضوع چالش برانگیز در برنامه‌ریزی و مدیریت سیلاب می‌باشد. مدل‌های مختلفی در این زمینه توسعه داده شده است و ضرورت دارد که کارایی مدل‌های توسعه داده شده در مناطق مختلف جهان با ویژگی‌های متفاوت اقلیمی، هیدرولوژیکی و فیزوگرافی مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان در مورد کارایی آنها در مناطق مختلف اظهار نظر کرد. مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما یک مدل توسعه داده شده در زمینه‌ی برآورد هیدروگراف سیل آب در حوضه‌های فاقد آمار است. در این مطالعه مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما برای برآورد مشخصه‌های هیدروگراف سیلاب در حوضه‌ی آبریز قره‌سو در استان کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفته است. معیارهای خطای دبی اوج، خطا حجم جریان، میانگین قدرمطلق خطا، میانگین بایاس خطا، ضریب تبیین و کلینگ-گوپتا برای ارزیابی دقت نتایج شبیه‌سازی برآورد گردید. بر اساس نتایج معیارهای ارزیابی بیان شده نشان داد که مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما از دقت کاملاً مناسب در برآورد مشخصه‌های هیدروگراف سیلاب برخوردار بوده است. بعلاوه مقایسه‌ی بصری هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی مبین دقت قابل توجه مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما در برآورد شکل هیدروگراف سیلاب در رویدادهای مورد مطالعه می‌باشد.

واژگان کلیدی: مدل گاما، شبیه‌سازی، برآورد سیلاب، حوضه‌ی آبریز قره‌سو استان کرمانشاه.

۱- مقدمه

حوضه‌ی آبریز به عنوان یک هیدروسستم متشکل از واحدهای هیدرولوژیک مرتبط به هم است، که نسبت به بارش ورودی واکنش نشان می‌دهد. این واکنش در ابعاد هیدروگراف سیلاب خروجی حوضه نمایان می‌گردد (سالاری جزی و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۵۹). بررسی ابعاد هیدروگراف سیلاب حوضه، دسترسی به مشخصاتی همچون دبی اوج و حجم سیلاب را، که در طراحی سازه‌های آبی نقش اساسی دارند فراهم می‌نماید. (ادیب و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۱۰) با توجه به نبودن اطلاعات کافی برای اندازه‌گیری میزان بارش و رواناب و کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری در کشورهای درحال توسعه اهمیت مدل‌های هیدروگراف واحد مصنوعی در برآورد مشخصه‌های سیلاب رودخانه‌ها در حوضه‌های فاقد آمار مورد توجه محققین قرار گرفته است. با توسعه سریع فن‌آوری‌های محاسباتی، در چندین دهه‌ی گذشته و افزایش نیاز به پیش‌بینی سیل در این زمینه مدل‌های مختلفی در برآورد سیلاب پیشنهاد شده که مدل Gamma نسبت به سایر مدل‌های دیگر دقیق‌تر بوده و کمتر مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته است. این موضوع به خصوص در حوضه‌های کوچک مطرح می‌باشد چون به دلیل هزینه بالای ایجاد ایستگاه‌های اندازه‌گیری و نیز هزینه نگهداری آن، با مشکل عدم وجود اطلاعات و داده‌های سیلاب مواجه می‌باشند. در زمینه‌ی برآورد سیلاب با استفاده از مدل‌های هیدروگراف واحد و نیز هیدروگراف واحد مصنوعی تحقیقات مختلفی انجام شده است (ادیب و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۰۱). با بررسی سه روش‌های جداسازی دبی پایه و دو روش جداسازی بارش مازاد به برآورد هیدروگراف واحد SCS در حوضه‌ی جنگ مشهد پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که با انتخاب نمودن مناسب‌ترین روش جداسازی نتایج مدل دقیق‌تر می‌گردد (بهرامی و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۶). مدل هیدروگراف واحد برای محاسبه هیدروگراف سیلاب ناشی از هایتوگراف بارندگی موثر حوضه‌ی آبریز توسعه داده شد. که تاکنون به طور گسترده‌ای در هیدرولوژی کاربردی مورد استفاده قرار گرفته است (عیدپور و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۶). با توجه به اهمیت مدل‌های هیدروگراف واحد مصنوعی در برآورد مشخصه‌های سیلاب رودخانه‌ها در حوضه‌های فاقد آمار انجام تحقیقات در این زمینه مورد توجه محققین قرار گرفته است. با استفاده از چهار مدل شناخته شده شماره‌ی منحنی، اشنایدر، گاما و گری برای تخمین هیدروگراف مصنوعی یک حوضه آبریز استفاده شد که در تخمین دبی اوج مدل اشنایدر، در برآورد حجم سیلاب مدل گری، در تخمین شکل هیدروگراف سیل و ارزیابی خصوصیات سیلاب مدل گاما منجر به جواب مناسب شده‌اند (سینگ، ۲۰۰۰: ۳۸۰). در تحقیقی برآورد دبی اوج و هیدروگراف سیلاب در جنوب غربی نیجریه را با استفاده از مدل‌های هیدروگراف واحد مصنوعی شماره‌ی منحنی، اشنایدر و گری بررسی کرده‌اند. نتایج بدست آمده نشان داد که در پنج حوضه برآوردهای مدل‌های شماره منحنی و گری نسبتاً

مشابه بوده است در حالی که دبی اوج سیلاب برآورد شده توسط دو مدل اشنایدر و گری برای دو حوضه نسبتاً نزدیک بوده است (سلامی و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۳). از سه مدل هیدروگراف واحد مصنوعی اشنایدر، گری و گاما بکار برده شده برای حوضه‌ای در نیجریه، کاربرد هر سه مدل مناسب توصیف شده است (سئول^۱ و همکاران، ۲۰۱۳: ۶۳۹). از ۶ واقعه ثبت شده بارش رواناب در حوضه‌ی امامه با استفاده از مدل کلارک و معیارهای عددی و گرافیکی مختلف نتایج نشان داد که با تحلیل و ارزیابی این مطالعه مدل بررسی شده منجر به تخمین مناسب زمان رسیدن به اوج و حجم سیلاب شده است (قربانی و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۳۷). با بررسی روش‌های جداسازی دبی پایه و بارش مزاد مشخص شد که انتخاب ترکیب این روش‌ها می‌تواند در برآورد مشخصات سیلاب در کاربرد مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما در حوضه جنگ در ایران تاثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد (بهرامی و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۴۲۰). با کاربرد مدل توسعه داده شده شماره‌ی منحنی بدون استفاده از داده‌های پوشش خاک و کاربری اراضی به برآورد هیدروگراف سیلاب در حوضه‌ی فاقد آمار امامه در این تحقیق از معیارهای مختلف دقت برآزش جهت ارزیابی چهار رویداد سیلاب استفاده گردیده شد. با توجه به نتایج، مدل توسعه داده تمایل به بیش برآوردی حجم سیلاب، کم برآوردی زمان رسیدن به اوج و بیش برآوردی دبی اوج دارد و در مجموع به‌طور نسبی تخمین قابل‌پذیرشی از هیدروگراف سیلاب ارائه می‌دهد (سالاری جزی و همکاران، ۲۰۱۷: ۴۶). به مقایسه‌ی کارآیی مدل زمان-سطح با هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک در برآورد سیلاب در حوضه‌ی آبریز کسلیان پرداختند. نتایج نشان داد روش ترسیمی در محاسبه‌ی ضریب ذخیره از دقت بالاتری برخوردار است و مدل کلارک نیز نتایج بهتری نسبت به مدل زمان-سطح ارائه کرد که نشان‌دهنده‌ی اثر ضریب ذخیره در روندیابی سیلاب در حوضه‌ی آبریز جنگلی کسلیان می‌باشد. لذا می‌توان از این روش برای محاسبه‌ی آبنمود ناشی از رگبار در حوضه‌های بدون آمار استفاده کرد (شاهدی و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۲۳). در مطالعه‌ای که به برآورد مقادیر ارتفاع و دبی پیک رواناب با استفاده از روش شماره‌ی منحنی (CN) در حوضه‌ی آبریز سراب دره‌شهر انجام شد. در نهایت جهت شناخت پارامترهای مؤثر بر دبی حداکثر هر کدام از زیرحوضه‌ها، از روش تحلیل عاملی براساس ۱۹ پارامتر محاسبه به عمل آمد که از بین پارامترهای مورد استفاده در زیرحوضه‌ها، دو پارامتر فیزیوگرافی (مساحت و تراکم زهکشی) تأثیر بیشتری در پتانسیل سیل‌خیزی حوضه‌ی آبریز سراب دارند (حجازی و همکاران، ۲۰۱۶: ۶۳). در مطالعه دیگری که به پیش‌بینی دبی جریان سیلاب با مدل بیان ژن و برآورد هیدروگراف آن با استفاده از دو مدل گری و گاما در آبریز حوضه‌ی قره‌سو انجام گرفت. بر اساس نتایج و مقدار دامنه‌های معیارهای بیان شده برای مدل گاما نشان از برتری مدل گاما نسبت به مدل گری بوده است و مدل منتخب توانست به شکل کاملاً مناسبی مشخصه‌های هیدروگراف سیلاب را برآورد سازد. بررسی این

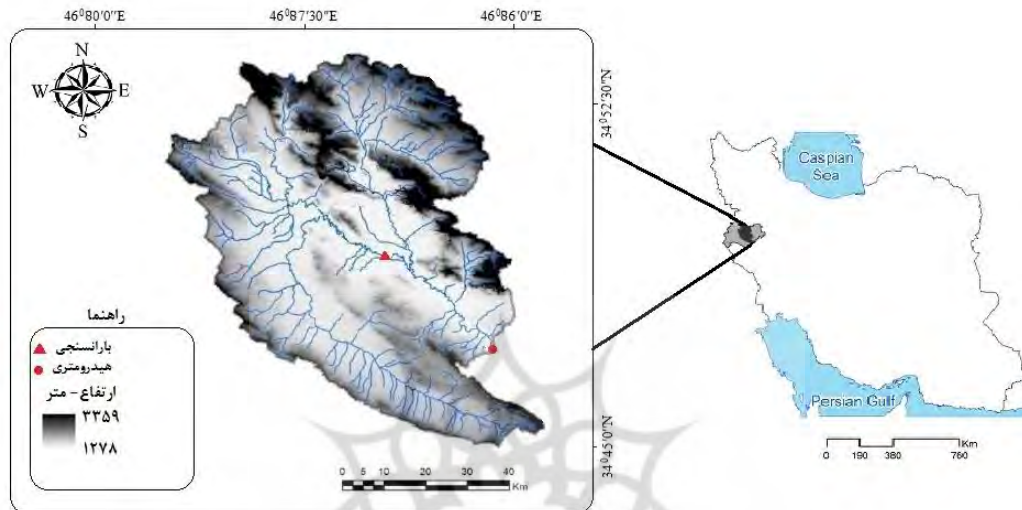
مدل در مدل سازی سیلاب در سایر حوضه های فاقد آمار نیز پیشنهاد می گردد (بهرامی و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۷۵). با بررسی و ارزیابی دو هیدروگراف گاما و اشنایدر در برآورد دبی اوج جریان و زمان رسیدن به دبی اوج در هیدروگراف، نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد هیدروگراف گاما نسبت به هیدروگراف اشنایدر تطابق خوبی در برآورد PETP و PEP بوده و یک منحنی مناسب برای شکل کلی آن فراهم می کند (آکانل و همکاران^۱، ۲۰۲۱: ۱). با استفاده از مدل گاما، وقایع هیدرولوژیکی سیلاب برای رودخانه ی یانگ تسه در چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان از تخمین دقیق مدل در برآورد دبی اوج و حجم جریان سیلاب داشت (ژانگ و همکاران^۲، ۲۰۲۱: ۲۲). با توجه به مطالعات انجام شده و نیاز کشور مبنی بر استفاده از مدل های هیدرولوژیک ساده و مناسب جهت پیش بینی سیلاب ضروریست که با انتخاب و به کارگیری نوع روش تلفات و نیز جداسازی جریان پایه به شکل جداگانه و همچنین تاثیر توأم آن ها بر روی شکل هیدروگراف سیل، میزان دبی اوج، حجم سیلاب و نیز زمان رسیدن به دبی اوج دبی سیلاب و زمان شروع سیل و خاتمه آن مطالعه گردد (وارتالسکا و همکاران^۳، ۲۰۲۰: ۱۴۹). بدیهی است بررسی مقایسه ای این روش ها می تواند منجر به دستیابی به یک نتیجه اولیه شود که تاکنون در کشور مورد توجه قرار نگرفته است. لذا با توجه به اهمیت این موضوع در این زمینه، هدف از این مطالعه استفاده از روش های جداسازی دبی پایه در برآورد رواناب های سطحی و روش جداسازی بارش مازاد توسط مدل هیدروگراف واحد مصنوعی Gamma به منظور شناسایی و بررسی دقت، صحت و درجه اطمینان مدل در برآورد و شبیه سازی هیدروگراف سیل در حوضه ی آبریز قره سو در غرب کشور است که به دلیل دارا بودن آمار و اطلاعات مناسب بارندگی و رواناب و وجود ایستگاه های ثابت بارندگی و هیدرومتری از این حوضه استفاده گردیده است.

۲- مواد و روش ها

حوضه ی آبریز قره سو به مساحت ۵۲۷۸ کیلومتر مربع و با مختصات جغرافیایی به طول $34^{\circ}45'$ تا $34^{\circ}52'$ و عرض $46^{\circ}86'$ تا $46^{\circ}80'$ در استان کرمانشاه و در غرب ایران واقع شده است. حداکثر و حداقل ارتفاع آن به ترتیب ۳۳۶۰ و ۱۲۷۰ متر و متوسط دمای سالانه $14/6$ درجه سانتی گراد است. حوضه ی قره سو از زیر حوضه های مهم حوضه آبریز کرخه است که دارای سه رودخانه ی اصلی مرگ، قره سو و رازآور می باشد که مهم ترین و بلندترین آن، قره سو به طول حدود $20/7$ کیلومتر که به صورت دائمی بوده و آب آن از ذوب برف و زه کشی آب های زیر زمینی و چشمه های آهکی تأمین می شود. متوسط بارندگی سالیانه در حوضه ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی متر بوده که بسیار متغیر می باشد. شکل ۱ موقعیت حوضه را نشان می دهد.

1- Acanel et al.
 2- Zhang et al.

3- Wartalska et al.



شکل (۱): نقشه‌ی حوضه‌ی قره‌سو و موقعیت ایستگاه‌های (بارسنجی و هیدرومتری)
Fig. (1): Map of Qarahu basin and location of stations (Rain gauge and hydrometry)

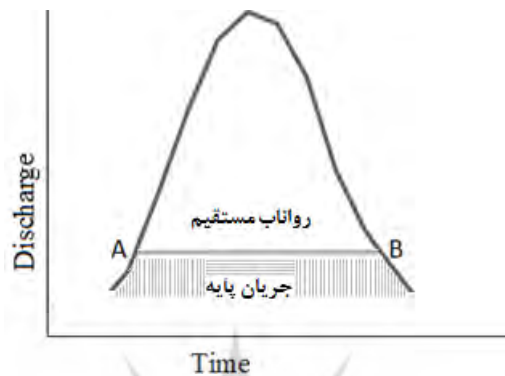
۲-۱- داده‌ها

به منظور استخراج اطلاعات بارش و دبی همزمان سیلاب در این تحقیق از اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی سراب نیلوفر و هیدرومتری قورباغستان بدلیل دارا بودن اطلاعات کافی و بروز نسبت به سایر ایستگاه‌های دیگر استفاده گردید. از میان اطلاعات موجود تعداد ۱۰ رویداد بارش - رواناب انتخاب شدند.

۲-۲- برآورد جریان پایه و بارش مازاد

۲-۲-۱- روش خط مستقیم

روش خط مستقیم ساده‌ترین روش برای جداسازی دبی پایه است. (چاو، ۱۹۸۸:۱۴۹) در هیدروگراف رودخانه از نقطه شروع سیل خط مستقیم به نقطه‌ای که سیل خاتمه پیدا می‌کند رسم می‌شود. بخشی از هیدروگراف که بالای این خط قرار می‌گیرد هیدروگراف رواناب مستقیم است. در شکل ۲ روش مورد استفاده به صورت شماتیک به نمایش درآمده است.



شکل (۲): روش مجزا کردن دبی پایه از هیدروگراف

Fig. (1): The Method of base flow separation from the Hydrograph

۲-۲-۲ روش \emptyset

بارش مازاد یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکل هیدروگراف محسوب می‌گردد و عکس‌العمل هیدرولوژیکی هر حوضه‌ی آبریز در قالب شاخص‌هایی از قبیل دبی اوج، زمان پایه و زمان تا اوج به طور مستقیم تحت تأثیر الگوی بارش مازاد مربوطه خواهد بود. به منظور تعیین ارتفاع بارش مازاد در این مطالعه از شاخص \emptyset استفاده گردید. در این روش ارتفاع رواناب مستقیم به صورت R_D تعریف می‌شود. برای برآورد شاخص \emptyset از معادله‌ی ۲ ذیل استفاده می‌شود.

(چاو، ۱۹۸۸: ۱۴۹) مقدار \emptyset با انتخاب یک فاصله زمانی ΔT و تخمین تعداد فواصل M بارش که عملاً به رواناب مستقیم می‌پیوندد، و با کم کردن $\emptyset \Delta T$ از بارش اندازه‌گیری شده در هر فاصله‌ی زمانی رواناب مستقیم حاصل می‌گردد.

در این معادله

$$R_D = \sum (R_M - \emptyset \Delta T) \quad (1)$$

R_M : بزرگ‌ترین پالس بارش (mm)

R_D : رواناب مستقیم (mm)

\emptyset : شاخص فی (mm/h)

M : تعداد پالس بارش مازاد است

۲-۳-مدل گاما

به منظور محاسبه هیدروگراف واحد مصنوعی Gamma که در مقایسه با دیگر روش‌های موجود راحت‌تر و دقیق‌تر می‌باشد. این مدل با ارائه یک تقریب دقیق، روابط تجربی را برای برآورد شکل عمومی لازم برای IUH بیان می‌کند.

$$F(x) = \frac{x^\alpha e^{-x/\beta}}{\beta^{\alpha+1} \Gamma(\alpha+1)} \quad (2)$$

پارامتر α یک عامل بدون بعد و باید بزرگ‌تر از ۱- باشد و β یک مقیاس مثبت است. با تعیین α و β می‌توان مقدار اوج هیدروگراف از معادله (۲) بدست آورد. (آرون و وایت، ۱۹۸۲: ۹۵) معادله‌ی ۲ را توسعه دادند. و با جای‌گذاری کردن t به جای x و بدست آوردن Q_p و t_p معادله‌ی ۳ حاصل گردید.

$$\emptyset(\alpha) = \frac{C_V A}{t_p} Q_p \quad (3)$$

Q_p : حدا کثر میزان جریان

C_V : عامل تبدیل

\emptyset و A : به ترتیب شاخص بدون بعد و مساحت

با استفاده از معادله‌ی ۳، مقدار $\emptyset(\alpha)$ بدست خواهد آمد. و سپس مقدار α را با استفاده از معادله‌ی ۴ حاصل می‌گردد.

$$\alpha = 0.5\emptyset + 5.9 \emptyset^2 \quad (4)$$

با بدست آوردن α و ضرب کردن a در مقدار t_p و جایگزینی در معادله‌ی ۲ هیدروگراف واحد طبق معادله‌ی ۵ برای هر مقدار حاصل می‌گردد.

$$Q_{at_p} = Q_p a^\alpha e^{(1-a)\alpha} \quad (5)$$

۲-۴-معیارهای ارزیابی شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل هیدروگراف واحد مصنوعی می‌توان از معیارهای مختلفی بهره برد. در این بررسی معیارهای خطای دبی اوج (PEP)، خطا در برآورد حجم جریان (PEV)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، میانگین بایاس خطا (MBE)، ضریب تبیین (R^2) و کلینگ-گوپتا (KGE) مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر معیار کلینگ-گوپتا در کاربردهای

هیدروژئومورفولوژیکی تعریف و مورد توجه قرار گرفته است. روابط مورد استفاده برای برآورد این معیارها در ذیل ارائه شده است.

$$PEP = (1 - \frac{Q_c}{Q_0}) \quad (6)$$

$$PEV = (1 - \frac{VOL_c}{VOL_0}) \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{oi} - Q_{ci}|}{n} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ci})}{n} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{(\sum(Q_{ci} - \bar{Q}_{ci})(Q_{oi} - \bar{Q}_{oi}))^2}{\sum(Q_{ci} - \bar{Q}_{ci})^2 \sum(Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2} \quad (10)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (11)$$

در روابط فوق:

Q_{oi} : مقدار مشاهده شده، Q_{ci} : مقدار برآورده شده، n : تعداد داده‌ها، Q_c : دبی محاسبه شده، Q_0 : دبی مشاهده‌ای،
 VOL_c : حجم محاسبه شده، VOL_0 : حجم مشاهده شده، \bar{Q}_{ci} : میانگین مقادیر برآورد شده، \bar{Q}_{oi} : میانگین مقادیر
مشاهده شده،

CC : ضریب همبستگی خطی بین Q_c و Q_0 ، α : نسبت انحراف معیار Q_c بر انحراف معیار Q_0 ، β : نسبت میانگین
 Q_c بر میانگین Q_0

۳- یافته‌ها و بحث

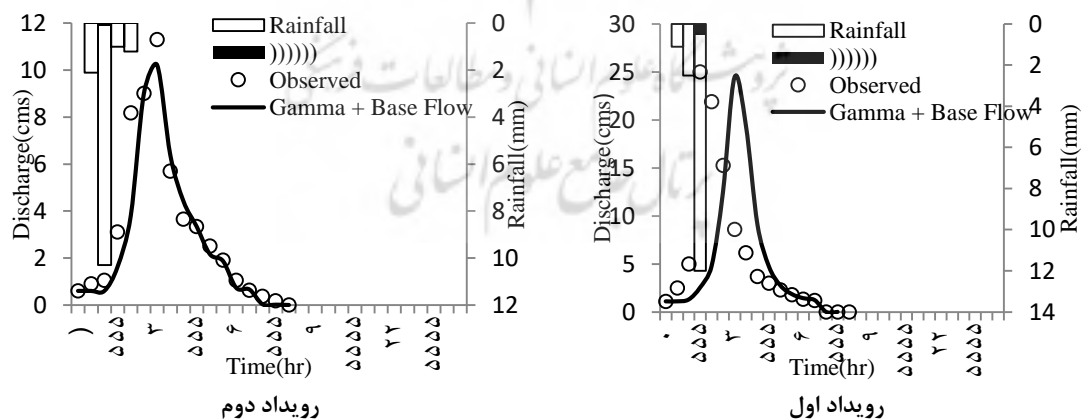
همانگونه که بخش قبلی گفته شد به منظور استخراج اطلاعات بارش و دبی هم زمان سیلاب، از آمارهای بارش و دبی سیلابی موجود در ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری در حوضه‌ی آبریز قره‌سو استفاده شد. از میان اطلاعات موجود تعداد ۱۰ رویداد بارش- رواناب از بازه‌ی زمانی (۱۳۹۰ الی ۱۳۹۹) انتخاب شدند. به منظور بدست آوردن رواناب، جریان پایه به روش خط افقی از هیدروگراف جدا شد و هیدروگراف رواناب مستقیم به دست آمد. برای برآورد عمق و الگوی بارش موثر نیز از روش شاخص \emptyset استفاده و این الگو با توجه به بکارگیری تکنیک سعی و خطا استخراج شد. اطلاعات مربوط به رخداد‌های بارش- رواناب مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول (۱): مشخصه‌های رویدادهای بارش - رواناب مورد استفاده در حوضه‌ی آبریز قره‌سو

Table (1): Features of rainfall-runoff events used in Qarahu catchment

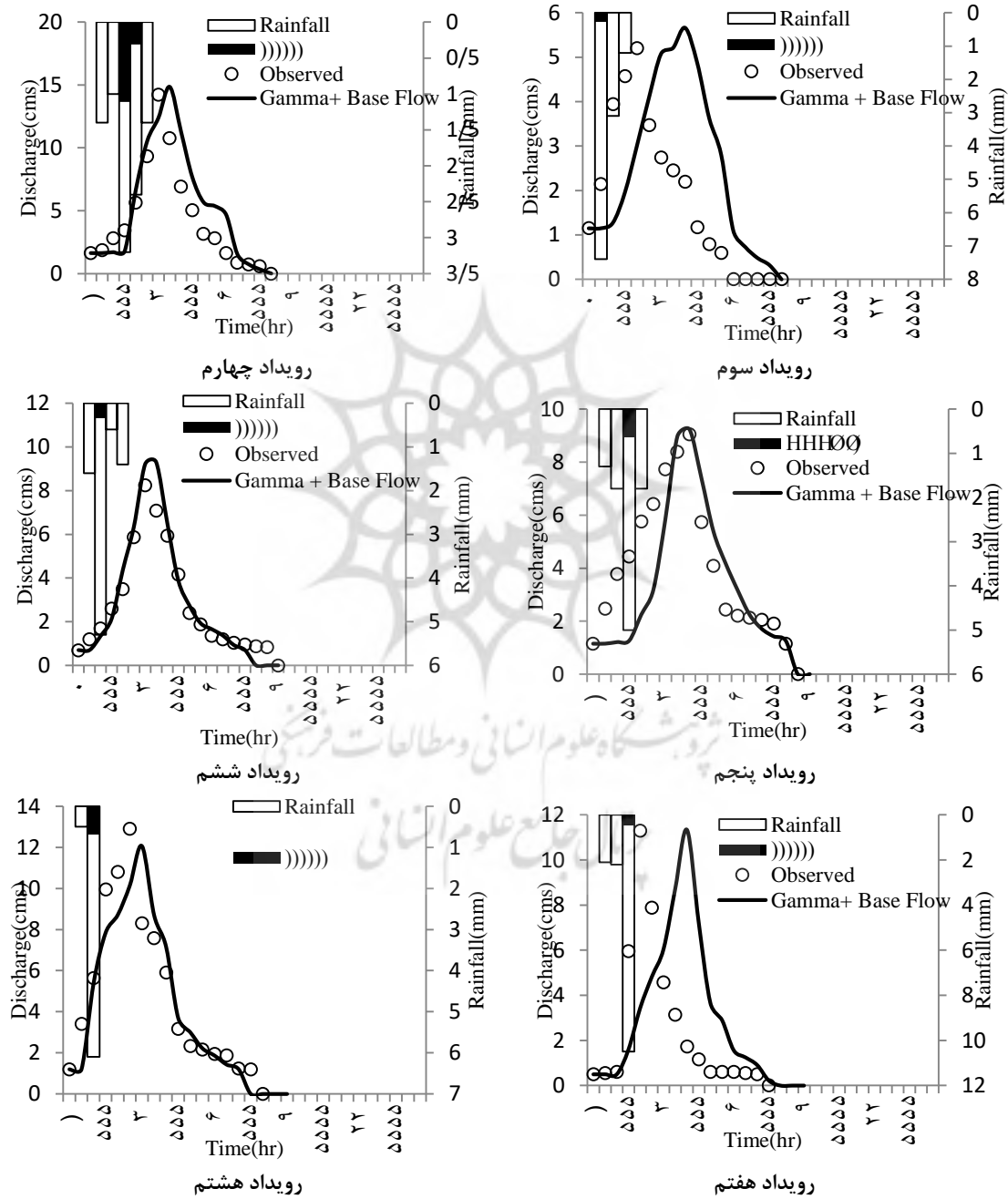
رویداد	تاریخ رویداد	تلفات بارش (mm)	شاخص Ø	رویداد	تاریخ رویداد	تلفات بارش (mm)	شاخص Ø
۱	۱۳۹۰/۰۳/۰۹	۱۵/۵	۰/۴	۶	۱۳۹۵/۱۱/۲۰	۸/۹	۰/۴۳
۲	۱۳۹۱/۰۳/۲۲	۱۳/۶	۰/۲	۷	۱۳۹۶/۱۰/۲۰	۱۳/۸	۰/۴۲
۳	۱۳۹۲/۱۰/۲۶	۱۲/۷	۰/۳۰	۸	۱۳۹۷/۰۱/۱۵	۵/۷	۰/۶۷
۴	۱۳۹۳/۰۹/۲۹	۸/۴	۱/۳۲	۹	۱۳۹۸/۱۰/۰۶	۱۰/۸	۰/۴
۵	۱۳۹۴/۰۸/۰۸	۷/۹	۰/۶۲	۱۰	۱۳۹۹/۰۲/۱۰	۸/۱	۰/۲۵

با توجه به کاربرد مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما، هیدروگراف سیلاب برآورد گردید. مقایسه‌ی گرافیکی هیدروگراف سیلاب برآورد شده با مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما و هیدروگراف سیلاب مشاهداتی در شکل ۳ ارائه شده است. در شکل ۳ عبارات مورد استفاده در شکل به صورت Rainfall: مقدار بارندگی ثبت شده، ERH: مقدار بارش مازاد محاسبه شده با استفاده از روش Ø Base Flow: دبی پایه جداسازی شده از رواناب، Gamma + Base Flow: هیدروگراف سیلاب برآورد شده با استفاده از مدل گاما در ترکیب با جریان پایه، Observed Hydrograph: هیدروگراف مشاهده‌ای سیلاب می‌باشد. بعلاوه معیارهای دقت شبیه‌سازی در رویدادهای مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

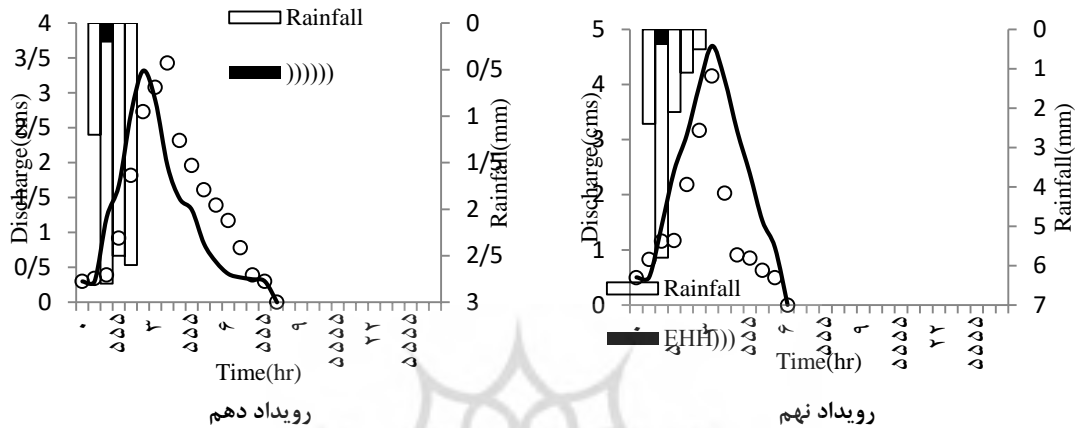


شکل (۳): هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای رویداد اول تا دهم

Fig (3): Observational and simulated hydrographs for the first to tenth event



ادامه‌ی شکل (۳): هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای رویداد اول تا دهم
Con. Fig (3): Observational and simulated hydrographs for the first to tenth event



ادامه‌ی شکل (۳): هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای رویداد اول تا دهم
Con. Fig (3): Observational and simulated hydrographs for the first to tenth event

نتایج ارائه شده در شکل ۳ مبین آن است که در همه رویدادهای مورد بررسی شکل هیدروگراف برآورد شده با استفاده از مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما در تطابق کاملاً مناسبی با هیدروگراف سیلاب مشاهداتی قرار دارد.

جدول (۲): معیارهای خطاها برای شبیه‌سازی رویدادهای مورد بررسی

Table (2): Error criteria for simulating the studied events

KGE	PEV	PEP	R ²	MBE	MAE	
۰/۷۶	۱۰/۷۶	۲/۳۲	۰/۶۱	۰/۴۴	۱/۰۳	رویداد اول
۰/۸۶	۱۲/۶	۹/۵۰	۰/۸۸	۰/۴۵	۰/۶۴	رویداد دوم
۰/۸۳	۲۰/۰۹	-۸/۹۰	۰/۷۲	-۰/۷۵	۰/۸۱	رویداد سوم
۰/۷۸	-۲۴/۱	-۴/۳۵	۰/۸۲	-۰/۹۵	۰/۷۰	رویداد چهارم
۰/۷۵	۱۴	-۲	۰/۶۹	۰/۵۴	۱/۲۸	رویداد پنجم
۰/۹۰	-۷/۲۰	-۱۲/۸	۰/۹۷	-۰/۱۸	۰/۴۲	رویداد ششم
۰/۶۹	-۲۷/۶	-۰/۳۵	۰/۵۶	-۰/۸۸	۱/۶۶	رویداد هفتم
۰/۸۴	۴/۷۴	۶/۵۱	۰/۸۴	۰/۲۲	۰/۹۱	رویداد هشتم
۰/۴۸	-۴۰/۱	-۱۲/۹	۰/۷۳	-۰/۸۲	۰/۸۴	رویداد نهم
۰/۶۴	۱۳	۳/۲۰	۰/۶۰	۰/۲۲	۰/۶۹	رویداد دهم

در تحلیل رویدادها ابتدا به بررسی توام معیارهای MAE، MBE و R² که پارامترهایی جهت تعیین کارایی مدل در شکل هیدروگراف سیلاب هستند که بر روی شکل هیدروگراف تاثیر دارند، مشاهده می‌شود که مدل Gamma با بهترین نتیجه در برآورد شکل هیدروگراف محاسباتی داشته است. بررسی معیار PEP نشان می‌دهد که در بین ده رویداد مورد بررسی معیار خطا در برآورد دبی اوج نشان می‌دهد که به طور نسبتاً مساوی مدل هیدروگراف

واحد مصنوعی گاما در برخی رویدادها به کم برآوردی و در برخی رویدادها به بیش برآوردی دبی اوج هیدروگراف سیلاب منجر شده است. البته با توجه به اعداد ارائه شده برای این معیار در جدول ۲ مقدار خطا در این زمینه کاملاً محدود می‌باشد. در مورد برآورد حجم سیلاب با در نظر گرفتن معیار PEV مشاهده شد که مدل به بهترین دقت در برآورد حجم سیلاب بوده است. بررسی معیار خطا در برآورد حجم سیلاب نیز بیانگر آن است که رفتار مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما در بیش برآوردی و کم برآوردی حجم سیلاب در رویدادهای مورد بررسی نسبتاً متعادل است. البته باید به این نکته توجه داشت که مقادیر ارائه شده برای این معیار در مدل سازی حوضه فاقد آمار کاملاً قابل پذیرش است. در زمان رسیدن به دبی اوج PETP مدل با دقت خوبی زمان دبی اوج را شبیه‌سازی کرده است. معیارهای کلینگ-گوپتا و ضریب تبیین مبین دقت سیلاب است که هر دوی این معیارها در رویدادهای مختلف نشان‌دهنده‌ی دقت کامل و مناسب مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما برای برآورد هیدروگراف سیلاب در رویدادهای مورد بررسی در حوضه‌ی آبریز قره‌سو است. در مجموع با بررسی توام همه معیارهای ارزیابی، مدل Gamma نشان‌دهنده‌ی دقت کامل و مناسب مدل هیدروگراف واحد مصنوعی گاما برای برآورد هیدروگراف سیلاب در رویدادهای مورد بررسی در حوضه‌ی آبریز قره‌سو است.

۴- نتیجه‌گیری

مدل گاما یک مدل کاربردی است که از پتانسیل مناسبی برای برآورد رواناب سیلاب در حوضه‌های فاقد آمار برخوردار است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر روی مطالعات گذشته مشاهده شد که در اکثر مطالعات صرفاً یک روش برای تخمین بارش مازاد یا جداسازی جریان پایه استفاده شده است و توجه چندانی به این مسأله نشده است. ویژگی مدل‌های توسعه داده شده برای حوضه‌های فاقد آمار اینست که با استفاده از داده‌های محدود و بدون در نظر گرفتن داده‌های ثبت شده همزمان بارش-رواناب می‌تواند برای برآورد هیدروگراف سیلاب مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه مدل‌سازی سیلاب در حوضه‌ی آبریز قره‌سو در استان کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفت و ده رویداد بارش-رواناب برای بررسی کارایی این مدل استفاده گردید. معیارهایی مانند معیارهای خطای دبی اوج، خطا حجم جریان، میانگین قدرمطلق خطا، میانگین بایاس خطا، ضریب تبیین و کلینگ-گوپتا برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

معیارهای مورد اشاره در این بررسی به ترتیب در دامنه‌های (۹/۵۰، ۱۲/۹-)، (۲۰/۰۹، ۴۰/۱-)، (۰/۴۲، ۱/۶۶)، (۰/۵۴، ۰/۹۵-)، (۰/۵۶، ۰/۹۷) و (۰/۴۸، ۰/۹۰) قرار دارد که نشان‌دهنده‌ی این است که مدل هیدروگراف واحد مصنوعی به شکل کاملاً مناسب منجر به برآورد مشخصه‌های هیدروگراف سیلاب در حوضه‌ی آبریز قره‌سو شده است. نتایج این بررسی نشان از دقت مناسب مدل‌سازی هیدروگراف سیلاب در حوضه‌ی آبریز مورد مطالعه دارد و بررسی این مدل در مدل‌سازی سیلاب در سایر حوضه‌های فاقد آمار نیز پیشنهاد می‌گردد.

۵-منابع

- Acanal, N. (2021). Snyder-gamma synthetic unit hydrograph. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(4): 1-12.
- Adib, A., Salarijazi, M., & Najafpour, K. (2010). Evaluation of synthetic outlet runoff assessment models. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 14(3).
- Adib, A., Salarijazi, M., Shooshtari, M.M., & Akhondali, A.M. (2011). Comparison between characteristics of geomorphoclimatic instantaneous unit hydrograph be produced by GcIUH based Clark Model and Clark IUH model. *Journal of Marine Science and Technology*, 19(2): 201-209.
- Aron, G., & White, E.L. (1982). Fitting a Gamma Distribution over a Synthetic Unit Hydrograph 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 18(1): 95-98.
- Bahrami, E., Khozayemnezhad, H. (2020). Predicting Flood Flow with Gene Expression Model and Estimating Hydrograph Using Gary and Gamma Models (Case study: Qarasu watershed of Kermanshah). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*. 3(3): 275-293.
- Bahrami, E., Mohammadrezapour, O., Salarijazi, M., & Jou, P. H. (2019). Effect of base flow and rainfall excess separation on runoff hydrograph estimation using gamma model (case study: Jong catchment). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(3): 1420-1426.
- Bahrami, E., Salarijazi, M., Mohammadrezapour, O., & Haghigat Jou, 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(1): 1-16.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., & Larry, W. (1988). *Mays. Applied hydrology*; International Edition; MacGraw-Hill. Inc.: New York, NY, USA, 149.
- Daei, S., Salarijazi, M., Ghorbani, K., & Halaghi, M.M. (2019). Assessment of Developed 1-parameter Mishra-Singh Model for Flood Hydrograph Estimation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(1): 201-213.
- Daei, S., Salarijazi, M., Ghorbani, K., & Halaghi, M.M. (2019). Assessment of Developed 1-parameter Mishra-Singh Model for Flood Hydrograph Estimation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(1): 201-213.
- Daei, S., Salarijazi, M., Ghorbani, K., & Meftah Halaghi, M. (2019). The Application of the Modified Curve Number (Three Parameters Mishra-Singh) Model to Flood Estimation. *Hydrogeomorphology*, 5(17): 145-163.
- Eidipour, A., Akhondali, A. M., Zarei, H., & Salarijazi, M. (2016). Flood hydrograph estimation using GIUH model in ungauged karst basins (Case study: Abolabbas basin). *TUEXENIA*, 36(36): 26-33.

- Ghorbani, K., Salarijazi, M., Abdolhosseini, M., Eslamian, S., & Ahmadianfar, I. (2019). Evaluation of Clark IUH in rainfall-runoff modelling (case study: Amameh Basin). *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 9(2): 137-153.
- Hejazi, A., & Mezban, M. (2016). The estimation of runoff volume and maximum discharge by using curve number (CN) Method (case study in Darrehshahr Drainage Basin). *Hydrogeomorphology*, 2(5): 63-81.
- Salami, A.W., Bilewu, S.O., Ayanshola, A.M., & Oritola, S.F. (2009). Evaluation of synthetic unit hydrograph methods for the development of design storm hydrographs for some rivers in South-West, Nigeria.
- Salarijazi, M., Abdolhosseini, M., Ghorbani, K., & Esamian, S. (2016). Evaluation of quasi-maximum likelihood and smearing estimator to improve sediment rating curve estimation. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 6(4): 359-370.
- Ghorbani, K., & Abodolhosseini, M. (2017). Estimation of Surface Runoff Hydrograph in Ungauged Basin without Land Cover and Land Use Data. *Irrigation and Water Engineering*, 7(2): 46-61. [in persian]
- Shahedi, K., Asadi, H., & Golshan, M. (2016). Comparison of Time-area and Clark Instantaneous Unit Hydrograph Models Efficiency to Reconstruct Flood Hydrographs at Kasilian Watershed. *Hydrogeomorphology*, 2(7): 123-139.
- Sharifi, A., Salarijazi, M., & Ghorbani, K. (2017). Event-Oriented Runoff Estimation in Mountainous Basin by GSSHA Physically-Distributed Model. *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(4): 1215-1225.
- Singh, S.K. (2000). Transmuting synthetic unit hydrographs into gamma distribution. *Journal of Hydrologic engineering*, 5(4), 380-385.
- Sule, B.F., & Alabi, S.A. (2013). Application of synthetic unit hydrograph methods to construct storm hydrographs. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 5(11): 639-647.
- Wartalska, K., Kaźmierczak, B., Nowakowska, M., & Kotowski, A. (2020). Analysis of Hyetographs for Drainage System Modeling. *Water*, 12(1): 149.
- Zhang, C., Ji, C., Wang, Y., & Xiao, Q. (2021). Flood Hydrograph Coincidence Analysis of the Upper Yangtze River and Dongting Lake, China.