

ارزیابی روش‌های برآورد زمان پیمایش جریان روزمینی و آبراهه‌ای در مدل PGIUH به منظور شبیه‌سازی هیدروگراف سیل (مطالعه موردی: حوضه آبریز امامه، استان تهران)

مهدی امینی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
سیدموسی حسینی* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
شیرین محمدخان - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
ابراهیم مقیمی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
مجتبی یمانی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲

چکیده

ساختار مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی احتمالاتی (PGIUH) متشکل از سیستم رده‌بندی آبراهه‌ای استراهلر و قوانین هورتن و نیز زمان پیمایش جریان آب بر روی سطوح (جریان روزمینی) و آبراهه‌های رده‌های مختلف حوضه جهت پیش‌بینی هیدروگراف خروجی حوضه است. الگوی شبکه‌بندی آبراهه‌ای را می‌توان ساختار ثابت و زمان‌های پیمایش جریان‌های روزمینی و آبراهه‌ای را عناصر متغیر مدل به شمار آورد. روابط تجربی گوناگونی جهت تخمین زمان پیمایش جریان‌های روزمینی و آبراهه‌ای در دنیا ارائه شده است. در این نوشتار پس از استخراج پارامترهای فیزیکی و ژئومورفولوژیکی مورد نیاز مدل از طریق DEM ۱۲/۵ متری حوضه، تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و منابع نوشتاری مربوط به حوضه آبریز امامه، صحت محاسباتی تعدادی از روابط زمان پیمایش (شامل ۵ رابطه مربوط به جریان روزمینی و ۵ رابطه مربوط به جریان آبراهه‌ای) از طریق مقایسه آماری هیدروگراف‌های پیش‌بینی شده با تعداد ۱۰ واقعه بارش-رواناب در حوضه امامه مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که زمان پیمایش سطوح تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر تخمین هیدروگراف حوضه (دبی اوج، زمان رسیدن به دبی اوج و حجم سیلاب) نداشته است ولی تاثیر زمان پیمایش آبراهه‌ها و به‌خصوص آبراهه اصلی تعیین‌کننده بوده است. عدم تاثیر زمان پیمایش سطوح ناشی از کوتاهی مسیر جریان آب در حوضه مورد مطالعه بوده است. همچنین هیچ یک از روابط زمان پیمایش آبراهه‌ای قادر نبوده است تمامی وقایع را به خوبی شبیه‌سازی کند. برخی از روابط وقایع معمول و پرتکرارتر حوضه و تعدادی دیگر از روابط وقایع شدیدتر و با دبی اوج بالاتر را بهتر تخمین زده‌اند. زیرا وقایع گوناگون از سرعت جریان آب مختلف و در نتیجه زمان پیمایش‌های آبراهه‌ای مختلفی برخوردارند و روابط گوناگون، زمان پیمایش آبراهه‌ها به ویژه آبراهه اصلی را متفاوت تخمین زده‌اند. همچنین نوع پارامترهای بکار رفته در روابط در نتایج به دست آمده تاثیرگذار بوده‌اند. بکارگیری پارامتر وسعت حوضه آبرگیر (A) در یکی از روابط، میانگین نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۱۰ واقعه را بهبود بخشیده است و نیز پارامتر شدت بارش موثر (\bar{e}) در یکی دیگر از روابط باعث شده تا برخلاف سایر روابط، هم برخی از کم‌شدت‌ترین (دارای کمترین دبی اوج) و هم تعدادی از پرشدت‌ترین آنها (دارای بالاترین دبی اوج) در بین بهترین نتایج آن قرار گیرد. نتایج این مطالعه می‌تواند در تحلیل و انتخاب روابط زمان پیمایش جهت پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های دارای اقلیم نیمه مرطوب مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: مدل PGIUH، زمان پیمایش، جریان روزمینی، جریان آبراهه‌ای، هیدروگراف سیل

مقدمه

شکل، حجم، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج هیدروگراف حوضه‌ها یا هر نقطه دیگری در امتداد آبراهه (زهکش - مسیل) اصلی حوضه پارامترهای مهمی هستند که در محاسبات و پیش‌بینی‌های مسائل مربوط به مدیریت آب‌های سطحی و سیل‌خیزی مد نظر قرار می‌گیرند. ویژگی‌های بارش، خصوصیات هواشناختی، ویژگی‌های حوضه و خصوصیات ذخیره بر رواناب (راگونات^۱، ۲۰۰۶، ۱۰۵) و در نتیجه خصوصیات هیدروگراف تاثیرگذارند. مدل‌های متعددی با استفاده از متغیرهای مربوط به خصوصیات حوضه و ویژگی‌های بارش سعی در تخمین هرچه دقیق‌تر هیدروگراف دارند. مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی احتمالاتی (PGIUH)^۲ یکی از انواع مدل‌های GIUH است که از دو جزء تشکیل شده است: ۱- ژئومورفولوژی حوضه ۲- شرایط هیدرولیکی حرکت قطره آب در امتداد آبراهه (پریه‌را و همکاران^۳، ۲۰۱۶، ۳۴۷). مدل‌های GIUH از قوانین هورتن-استراهلر^۴ برای ارائه هیدروگراف واحد لحظه‌ای (IUH)^۵ استفاده می‌کنند. این قوانین تجربی شامل نسبت انشعاب^۶، نسبت طول آبراهه^۷ و نسبت مساحت^۸ هستند که برای یک حوضه ثابتند (گوینداراجو و ژانگ^۹، ۲۰۰۳، ۲۰). طبق قانون رده‌بندی هورتون-استراهلر، یک حوضه آبریز را می‌توان از لحاظ رواناب به چندین وضعیت تقسیم کرد و پاسخ هیدرولوژیکی حوضه را می‌توان تابعی از احتمال عبور رواناب از مسیرهای مختلف و احتمال وقوع زمان پیمایش^{۱۰} در وضعیت‌های گوناگون رواناب در نظر گرفت (لی و چانگ^{۱۱}، ۲۰۰۵، ۹۱-۹۲) زیرا این‌گونه فرض می‌شود که بارش مازاد مسیرهای مختلفی را بروی سطوح و در آبراهه‌های رده‌های مختلف می‌پیماید تا به خروجی حوضه برسد (جین و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۰، ۳۷۰). طبق این مدل فرض می‌شود که واحد ورودی (عمق واحد بارش مازاد) از تعداد نامتناهی قطره کوچک با اندازه یکسان تشکیل شده است که بدون اینکه بر یکدیگر تاثیری داشته باشند به طور آبی بر روی کل منطقه فرو می‌ریزند. زمان پیمایش قطره آبی که به صورت تصادفی انتخاب شده باشد، از نقطه شروع تا خروجی، هیدروگراف واحد لحظه‌ای حوضه را شکل می‌دهد (سینگ و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۴، ۸۹) که از آن هیدروگراف واقعی به دست می‌آید.

پیشینه شکل‌گیری مدل GIUH به کار رودریگز-ایتوربه و والدز^{۱۴} (۱۹۷۹) نسبت داده می‌شود. این پژوهشگران اولین بار مدل PGIUH را ارائه دادند. آنها همچنین با بیان اینکه نقطه اوج (q_p) و زمان رسیدن به نقطه اوج (t_p) مهمترین ویژگی‌های IUH هستند، مدل GIUH دیگری ارائه دادند که به این دو پارامتر و سرعت جریان آب (V) وابسته است و GIUH مثلی نامیده می‌شود چرا که به جای ارائه فرم کامل IUH، تقریبی مثلی شکل از آن را عرضه می‌دارد (رودریگز-ایتوربه و والدز، ۱۹۷۹، ۱۴۲۰-۱۴۰۹). در سال‌های بعد، پژوهشگران سعی در ایجاد تغییر، اضافه کردن اجزای جدید و یا تلفیق با سایر مدل‌ها به منظور ارتقای مدل GIUH یا برآورد پارامتر دلخواه‌شان داشته‌اند. وارد کردن اثرات

1. Raghunath

2. Probabilistic geomorphological instantaneous unit hydrograph

3. Pereira et al

4. Horton-Strahler

5. Instantaneous unit hydrograph

6. Bifurcation ratio

7. Stream length ratio

8. Area ratio

9. Govindaraju & Zhang

10. Travel-time

11. Lee & Chang

12. Jain et al

13. Singh et al

14. Rodriguez-Iturbe and Valdez

دامنه به مدل (فان در تاک و براس^۱، ۱۹۹۰، ۲۳۹۳-۲۴۰۰)، تلفیق با شبکه عصبی مصنوعی (مدل GANN) (گویندراجو و ژانگ، ۲۰۰۳، ۳۴-۱۸، نجفی و همکاران، ۲۰۰۷، ۳۱۶-۳۰۵)، ساخت مدل ترکیبی با استفاده از GIUH به منظور تخمین دبی و میزان مواد محلول (اپرت^۲، ۲۰۰۵، ۹۸-۱)، ارائه مدل GIUH مبتنی بر تلفیق تخمین آبهای سطحی و زیرسطحی (لی و چانگ^۳، ۲۰۰۵، ۹۱-۱۰۵)، وارد کردن محاسبات مربوط به میزان نفوذپذیری به مدل (راگووانشی و همکاران^۴، ۲۰۰۸، ۱۰۱۱-۱۰۲۵)، تلفیق با معادله اصلاح شده USLE (MUSLE) به منظور تخمین میزان رسوبدهی حوضه (آرخی و رستمی زاد، ۲۰۱۱، ۱۳۵۸-۱۳۴۶) و تلفیق با مدل Xinanjiang (یائو و همکاران^۵، ۲۰۱۴، ۱۰۳۵-۱۰۴۸، اویانگ و همکاران^۶، ۲۰۱۵، ۶۶-۷۶)، ارزیابی منحنی سنج رسوب با استفاده از PGIUH (لی و چانگ، ۲۰۱۷، ۱۸۲-۱۷۱)، ارزیابی تفاوت ویژگی‌های ژئومورفومتری و تاثیر آن بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌ها با استفاده از GIUH (مسعود و همکاران^۷، ۲۰۲۰، ۴۲-۱۰۳۸) از جمله این موارد است. محققان متعددی سعی در مقایسه مدل‌های GIUH (PGIUH و GIUH مثلثی) با سایر مدل‌ها و ارزیابی میزان انطباق نتایج آنها با داده‌های مشاهده‌ای داشته‌اند. نتایج تعدادی از این مطالعات در ایران که هر دو نوع مدل را شامل می‌شود به طور خلاصه در ادامه آورده شده است. در حوضه کنگیر در استان ایلام به دلیل وجود اشکال کارستی در سطح حوضه، کارایی GIUH مثلثی در برآورد شکل کامل هیدروگراف، پایین ولی در برآورد دبی پیک سیلاب‌ها، نسبتاً مناسب بوده است (بهرامی و همکاران، ۱۳۸۶، ۱). در حوضه معرف کسلیان واقع در دامنه شمالی البرز، مدل GANN نسبت به مدل‌های PGIUH و Nash نتایج بهتری ارائه داده است (نجفی و همکاران، ۲۰۰۹، ۹). در حوضه ليقوان مدل هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی مخزن (GUHR) نسبت به مدل GIUH عملکرد بهتری در شبیه‌سازی بازوهای هیدروگراف، شکل کلی هیدروگراف و حجم رواناب نشان داده است؛ اما نویسنده این را نیز مطرح می‌کند که GIUH با وجود استفاده نکردن از داده‌های بارش-رواناب می‌تواند با دقت قابل قبولی در حوضه‌های فاقد آمار به کار گرفته شود (غلامی صومعه، ۱۳۸۹، ۱۰۷-۱). مدل GIUH مثلثی در حوضه بار در خراسان رضوی از کارایی نسبتاً خوبی برخوردار بوده است که به گفته پژوهشگران عدم انطباق‌های مشاهده شده ناشی از احداث بندهای خاکی بوده است (مشاری عشق‌آباد، ۱۳۹۱، ۱۱۵). مدل GIUH در حوضه مهران واقع در دامنه جنوبی البرز مرکزی در بین مدل‌های Snyder، SCS و مثلثی از لحاظ برآورد دبی پیک لحظه‌ای بهترین تخمین را ارائه داده است و نویسندگان این مدل را برای حوضه‌هایی که ایستگاه بارانسنجی دارد توصیه کرده‌اند ولی برای حوضه‌های فاقد داده مدل Snyder را پیشنهاد داده‌اند (دباغیان امیری و محمدی، ۲۰۱۲، ۹۵). مدل GIUH مثلثی در حوضه جونقان در استان چهارمحال و بختیاری در برآورد دبی اوج و زمان تا اوج نسبت به SCS موفق‌تر عمل کرده است (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۲، ۲۰۵). مدل PGIUH در حوضه معرف کسلیان توانایی مناسبی در تخمین دبی اوج و شکل هیدروگراف داشته است (شکوهی و عزیزیان، ۱۳۹۲، ۱۷). در حوضه معرف کارده در خراسان شمالی، مدل GIUH از لحاظ دبی اوج و مدل Snyder از لحاظ زمان تا اوج هیدروگراف بهترین کارایی را در قیاس با یکدیگر و مدل‌های SCS و مثلثی ارائه داده‌اند (گلکاریان و همکاران، ۱۳۹۳، ۴۴۰). حسینی و همکاران (۲۰۱۵) مدل PGIUH را در حوضه‌های سیرا (بالادست سد کرچ) و و گلپایگان مورد استفاده قرار داده‌اند. طبق گفته محققین بهترین نتایج مدل برای هر دو حوضه در سال‌های بارشی نرمال و بیشترین خطا در نتایج مربوط به تخمین حجم رواناب برای

1. Van der Tak & Bras

2. Eppert

3. Lee & Chang

4. Raghuvanshi et al.

5. Yao et al.

6. Ouyang et al.

7. Masoud et al.

حوضه سیرا در سال‌های خشک به دست آمده است (حسینی و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۵). شکوهی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل PGIUH به ارزیابی میزان دقت چهار روش برآورد نفوذ در حوضه کسلیان پرداختند و طبق گفته آنها روش شاخص ϕ و سپس روش هورتون نسبت به روش‌های SCS و گرین-آمپت نتایج بهتری ارائه داده‌اند. آنها همچنین اظهار داشتند که عملکرد مدل نسبت به روش برآورد نفوذ و تعیین ضریب زبری جریان رو سطحی از حوضه سیت بالایی برخوردار است (شکوهی و همکاران، ۱۳۹۶، ۲۶۲ و ۲۷۴). سلاجقه و همکاران (۱۳۹۷) ضمن بکارگیری مدل GIUH مثلی در حوضه جاجرود با استفاده از پارامترهای ژئومورفولوژیکی به دست آمده از دو نقشه با مقیاس‌های مختلف اظهار داشتند که پارامترهای هورتونی در دو مقیاس تفاوت بسیار اندک داشته و هیدروگراف‌های حاصل بسیار شبیه بوده‌اند (سلاجقه و همکاران، ۱۳۹۷، ۹۶۸ و ۹۷۰). در حوضه سنقر کارایی دومدل Win TR-55 و GIUH مثلی در برآورد دبی حداکثر خوب بوده است ولی نتایج مدل Win TR-55 دقیق‌تر بوده است (ایلدرمی و غلامیان، ۱۳۹۹، ۱۳). در حوضه امامه نیز مطالعاتی در رابطه با کارایی مدل GIUH در قیاس با سایر مدل‌ها انجام شده است. یمانی و همکاران (۱۳۸۳) نتایج حاصل از GIUH مثلی را در حوضه امامه رضایت‌بخش اعلام کرده‌اند (یمانی و همکاران، ۱۳۸۳، ۱۱). یمانی و نصیری (۱۳۸۸) مدل GANN را نسبت به مدل GIUH در برآورد هیدروگراف حوضه امامه کارا تر توصیف کرده‌اند (یمانی و نصیری، ۱۳۸۸، ۴۱). طبق مطالعه محمدی و همکاران (۲۰۱۳) نتایج مدل GIUH مثلی در حوضه‌های امامه، مهران و کن نسبت به مدل‌های Snyder، SCS و مثلی بهتر بوده است؛ ولی نویسندگان GIUH را برای حوضه‌های دارای ایستگاه باران سنج و مدل Snyder را برای حوضه‌هایی که هیچ ایستگاهی ندارد، توصیه کرده‌اند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۳، ۱۰۵ و ۱۱۰). خالقی و همکاران (۲۰۱۴) نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل GIUH مثلی را در حوضه امامه رضایت‌بخش اعلام کرده‌اند و اظهار داشته‌اند که با افزایش تعداد وقایع، بر صحت، دقت و کارایی تخمین‌ها افزوده می‌شود (خالقی و همکاران، ۲۰۱۴، ۲۹).

زمان پاسخگویی^۱ حوضه به وقایع بارش که در قالب مفاهیمی مانند زمان تمرکز^۲ و زمان تاخیر^۳ مطرح می‌شود (گریکه و اسمیتز^۴، ۲۰۱۴، ۱۹۳۵-۱۹۷۱) در ابعاد و ویژگی‌های هیدروگراف‌های حاصل نقش اساسی دارد. در ساختار مدل PGIUH، مفهوم دیگری به نام زمان پیمایش تعبیه شده است که به معنای مدت زمان لازم برای انتقال آب از یک مکان به مکانی دیگر است (کتابچه راهنمای سرویس حفاظت منابع طبیعی ایالات متحده^۵، ۲۰۱۰، فصل ۱۵ ص ۲) و شامل دو جزء زمان پیمایش جریان روزمینی^۶ و زمان پیمایش جریان آبراهه‌ای^۷ است. روابط متعددی جهت محاسبه زمان تمرکز و زمان پیمایش در حوضه‌ها ارائه شده است که می‌توان از آنها در مدل استفاده کرد. چنانچه ساختار احتمالاتی مدل را ثابت نگه داریم، می‌توان از طریق تحلیل میزان تطابق هیدروگراف تخمینی با داده‌های مشاهداتی به میزان دقت محاسبه‌ای روابط زمان پیمایش پی برد. مطالعات پیشین در زمینه انواع مدل‌های GIUH که به تعدادی از آنها اشاره شد بر روی نتایج مدل تمرکز داشته‌اند و به صحت سنجی روابط زمان پیمایش نپرداخته‌اند. تشخیص روابط مناسب زمان تمرکز یا زمان پیمایش برای هر حوضه و استفاده از آنها در مدل مورد استفاده در این نوشتار یا دیگر مدل‌ها جهت پیش‌بینی دقیق‌تر هیدروگراف و مدیریت سیلاب از اهمیت برخوردار است. این نوشتار قصد دارد از طریق مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های مشاهداتی هیدروگراف، تعدادی از روابط مربوط به زمان پیمایش آبراهه‌ای و

1. Response time

2. Time of concentration

3. Lag time

4. Gericke & Smithers

5. Natural Resources Conservation Service (NRCS)

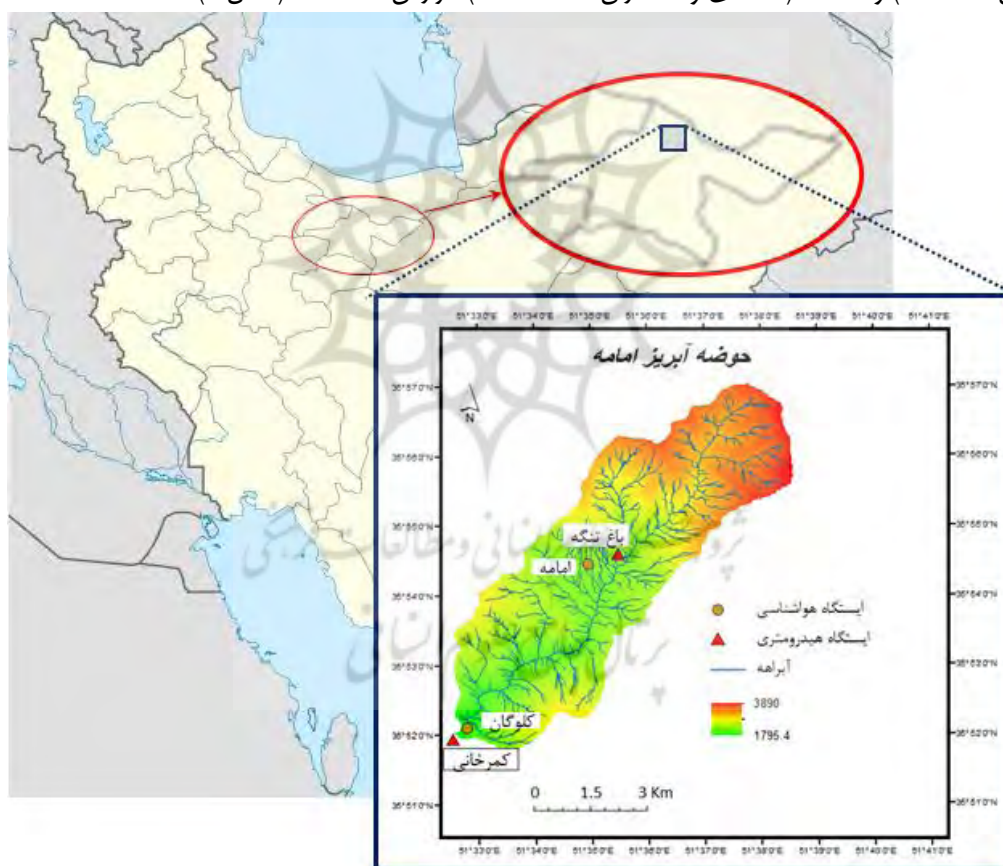
6. Streamflow travel time

7. Overlandflow travel Time

زمان پیمایش جریان روزمینی را به منظور دستیابی به بهترین ترکیب از این روابط برای حوضه مورد مطالعه و ارزیابی مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در زمان پیمایش مورد سنجش قرار دهد.

محدوده مورد مطالعه و اطلاعات پایه

حوضه آبخیز معرف امامه یکی از زیرحوضه‌های حوضه جاجرود است که در دامنه‌های جنوبی البرز و در محدوده سیاسی استان تهران واقع شده است. این حوضه در بالای سد لتیان واقع شده و مختصات جغرافیایی آن بین حدود ۳۵ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی و ۵۱ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی است. مساحت این حوضه ۳۷/۳۷ کیلومتر مربع و متوسط شیب آن ۵۵٪ است. متوسط ارتفاع حوضه ۲۶۸۰، حداکثر ارتفاع ۳۸۹۰ و حداقل ارتفاع ۱۷۹۵ متر است. رودخانه امامه در جهت شمال شرقی- جنوب غربی از ارتفاعات برف‌گیر حوضه سرچشمه می‌گیرد و با عبور از روستای امامه در مرکز و روستای کلوگان در انتهای حوضه به جاجرود می‌ریزد. طول رودخانه بین ۱۳ (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷، ۴) و ۱۳/۷۵ (محمدی و همکاران، ۲۰۱۳، ۱۰۸) گزارش شده است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت حوضه آبخیز امامه

حوضه امامه دارای دو ایستگاه هیدرومتری به نام‌های باغ‌تنگه واقع در مرکز و کمرخانی واقع در خروجی حوضه و دو ایستگاه هواشناسی به نام امامه در مرکز و کلوگان واقع در خروجی حوضه است. میانگین بارش از سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۹۴ که البته با نقص آمار در برخی از سالها مجموعاً ۳۸ سال را پوشش می‌دهد ۶۸۸ میلی‌متر بوده است. حداکثر میانگین بارش ماهانه به مقدار ۱۲۰/۴۴ میلی متر مربوط به فروردین ماه و حداقل آن به مقدار ۵۹/۱۱ میلی‌متر مربوط به مهرماه بوده است. متوسط دمای حوضه براساس آمار سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۹۴، ۱۱ درجه سانتیگراد و میانگین دبی حوضه در ایستگاه کمرخانی (خروجی حوضه) براساس آمار سال‌های ۱۳۷۸-۱۳۹۴، ۵۸/۰ مترمکعب در ثانیه بوده است (داده‌های وزارت

نیرو). در مجموع بر اساس آمار دما و بارش، اقلیم منطقه مورد مطالعه سرد و مرطوب (یا نیمه مرطوب) است. رژیم رودخانه امامه برفی- بارانی است و حداکثر دبی مشاهده شده طی دوره آماری ۱۳۵۱ - ۱۳۹۴، مربوط به واقعه تاریخ ۱۳۹۱/۰۵/۰۱ به مقدار ۴۵/۷۷ و دومین آن به مقدار ۳۱/۴ متر مکعب در ثانیه مربوط به واقعه ۹۲/۰۵/۱۹ بوده (داده‌های وزارت نیرو) که دومی در این نوشتار شبیه‌سازی شده است. همچنین در طی دوره آماری ۱۳۷۸ - ۱۳۹۴ حداکثر میانگین دبی ماهانه به مقدار ۱/۵۴ مترمکعب در ثانیه مربوط به فروردین ماه و حداقل آن به مقدار ۰/۰۹ متر مکعب در ثانیه مربوط به شهریور ماه بوده است (داده‌های وزارت نیرو).

پوشش اراضی حوضه امامه در سال ۱۳۹۲ به ترتیب مراتع درجه ۲، مراتع درجه ۳، کشاورزی و باغ و زمین‌های بایر بوده است. این نسبت در سال ۱۳۶۷ به ترتیب مراتع درجه ۱، مراتع درجه ۲، مراتع درجه ۳، کشاورزی و باغ و زمین‌های بایر بوده است. در طی این مدت مراتع درجه ۱ و ۲ کاهش و مراتع درجه ۳، اراضی کشاورزی و باغ، اراضی بایر و مناطق مسکونی افزایش پیدا کرده است که همین امر موجب افزایش متوسط دبی از ۰/۹ مترمکعب در ثانیه در سال ۱۳۶۷ (با بارش ۸۴۵/۹ میلی‌متر) به ۱/۶ مترمکعب در ثانیه در سال ۱۳۹۲ (با بارش ۷۶۹/۸ میلی‌متر) و افزایش دبی اوج هیدروگراف از ۳ به بیش از ۷ مترمکعب شده است. این نتایج حاصل مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS هستند (معتد وزیر و همکاران، ۱۳۹۶، ۶۴-۶۰).

مواد و روش‌ها

ابتدا شبکه زهکشی حوضه امامه با استفاده از DEM با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متری در نرم‌افزار ArcMap 10.3 و با استفاده از گزینه Hydrology در منوی Spatial Analyst Tools ترسیم و براساس سیستم رده‌بندی استرالر شماره‌گذاری شد. طبق نظر حسین زاده (۱۳۹۷) بهترین آستانه سلولی در استخراج شبکه زهکشی برای DEM های ۳۰ متری در مناطق کوهستانی ۲۵ است (حسین زاده، ۱۳۹۷، ۴۴۹). با توجه به کوهستانی بودن منطقه، انتخاب آستانه ۱۰۰ برای DEM انتخابی، ۵ رده آبراهه‌ای را برای حوضه مشخص کرد که همان نتیجه انتخاب آستانه ۲۵ برای DEM ۳۰ متری است. ویژگی‌های مورفومتریکی حوضه و شبکه آبراهه‌ای آن از طریق همان منو و همچنین با استفاده از الحاقیه Stream-Gradient استخراج گردید (جدول ۱).

جدول ۱: خلاصه ویژگی‌های مورفومتریکی حوضه امامه

Stream order	Stream number	Mean stream slope (m/m)	Mean stream length (km)	Mean subcatchment area (km ²)	Mean overland surface slope (m/m)	Mean overland surface length (m)	Mean stream width (m)
1	673	0.33	0.18	0.03	0.55	95.65	0.04
2	144	0.28	0.32	0.15	0.55	74.34	0.1
3	31	0.27	0.81	0.74	0.53	70.91	0.21
4	5	0.1	1.06	2.78	0.54	132.06	0.41
5	1	0.11	11.55	37.37	0.55	122.49	1.5

جهت تعیین ضریب زبری مانینگ^۱ سطوح و آبراهه‌ها که برای تعدادی از روابط زمان پیمایش مورد نیاز است با توجه به بررسی‌های سنجش از دوری حوضه و همچنین وجود شواهد مبنی بر فقیر بودن پوشش گیاهی حوضه (معتد وزیر و

1. Manning's roughness coefficient

همکاران، ۱۳۹۶، ۶۱ و ۶۴). از جدول چو (۱۹۵۹) گزینه بوته‌های پراکنده^۱ انتخاب و سه ضریب پیشنهادی ۰/۰۳۵ (حداقل مقدار)؛ ۰/۰۵ (متوسط) و ۰/۰۷ (حداکثر) (چو، ۱۹۵۹، ۱۱۳) انتخاب و زمان پیمایش جریان روزمینی برای هر یک از ضرایب مذکور محاسبه شده و در مدل به کار گرفته شد. همچنین با بررسی دو تا از منابع نوشتاری پیشین و با توجه به کوهستانی بودن منطقه و رودخانه امامه، نظر گیائی (۱۳۷۵) مبنی بر اینکه مقدار زبری آبراهه اصلی ۰/۰۵۵ است (گیائی، ۱۳۷۵، ۸۱) به واقعیت نزدیکتر تشخیص داده شد و جهت سادگی کار، چنانکه در مدل GIUH مرسوم است این رقم به سایر آبراهه‌ها تعمیم داده شد. عرض آبراهه اصلی در محل خروجی حوضه جهت استفاده در یکی از روابط مربوط به زمان پیمایش از طریق اندازه‌گیری بر روی Google Earth تعیین و با استفاده از رابطه ارائه شده توسط لی و همکاران (۲۰۰۸) به نقل از هوانگ و همکاران (۲۰۱۰)^۲ عرض خروجی سایر آبراهه‌ها تخمین زده شد (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۰، ۱۵۹) (رابطه ۱، جدول ۱):

$$B_{si} = B_{\Omega} \left(\frac{\bar{A}_i}{A} \right)^{0.5} \quad (1)$$

که در آن B_{si} : عرض آبراهه رده i ، B_{Ω} : عرض آبراهه در خروجی حوضه، \bar{A}_i : متوسط سطوح زهکشی رده i و A : مساحت حوضه می‌باشد. آمار داده‌های ساعتی بارش-رواناب از سازمان‌های مربوط اخذ و تعداد ۱۰ واقعه انتخاب شد (جدول ۳). با کسر مقادیر دبی رواناب از دبی پایه، رواناب مستقیم مربوط به هر واقعه به دست آمد. با دانستن عمق رواناب برای هر واقعه و از طریق آزمون و خطا، نمایه Φ به گونه‌ای تعیین شد که ضمن تعیین مقدار بارش موثر به ازای هر ساعت بارندگی، مجموع بارش موثر در طی ساعات بارندگی برابر با مقدار عمق رواناب باشد. در این مدل IUH برابر است با تابع چگالی احتمال (PDF) زمان‌های پیمایش سطوح (دامنه‌ها یا جریان روزمینی) و آبراهه‌های رده‌های مختلف که از رابطه زیر به دست می‌آید (گویندراجو و ژانگ، ۲۰۰۳، ۲۱):

$$IUH = h(t) = \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^j p(s) \cdot C_{ij} e^{-K_{xi}t} \quad (2)$$

$p(s)$ = احتمال انتخاب مسیر S توسط قطره آب. این مسیر به صورت $S = \langle x_{oi}, x_{si}, x_{sj}, \dots, x_{s\Omega} \rangle$ تعریف می‌شود و با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود (فرانکینی و اکائل^۴، ۱۹۹۶، ۴۱۱؛ لی و همکاران، ۱۹۹۷، ۷۵؛ گویندراجو و ژانگ، ۲۰۰۳، ۲۱؛ راگوانشی و همکاران، ۲۰۰۸، ۱۰۱۵):

$$p(s) = \pi_{oi} \cdot P_{oisi} \cdot P_{sisj} \cdot \dots \cdot P_{sks\Omega} \quad (3)$$

π_{oi} = احتمال وضعیت اولیه یا احتمال فرود قطره آب بر روی سطح رده i (نسبت مساحت سطح رده i به مساحت کل حوضه)

P_{oisi} = احتمال انتقال رواناب از سطح رده i به آبراهه رده i که یک در نظر گرفته می‌شود

P_{sisj} = احتمال انتقال رواناب از آبراهه رده i به آبراهه رده j

$$K_{xi} = \frac{1}{T_{xi}} \quad (4)$$

T_{xi} = زمان پیمایش رده i

1. Scattered brush

2. Huang et al.

3. Probability density function

4. Franchini & Ó Connell

$$C_{ij} = \frac{K_{x1} \cdot K_{x2} \cdot K_{x3} \dots \cdot K_{xj}}{(K_{x1} - K_{xi})(K_{x2} - K_{xi}) \dots (K_{xi-1} - K_{xi})(K_{xi+1} - K_{xi})(K_{xj} - K_{xi})} \quad (5)$$

رابطه ۳ ساختار احتمالاتی مدل را شکل می‌دهد و با بکارگیری سیستم رده‌بندی استراهلر و قوانین هورتن محاسبه می‌شود که جهت جلوگیری از اطاله بحث روابط مربوط آورده نشده است. روابط ۴ و ۵ نتایج زمان پیمایش رده‌های مختلف را مورد استفاده قرار می‌دهد. در این نوشتار ۱۰ رابطه زمان پیمایش که شامل ۵ رابطه مربوط به جریان روزمینی و ۵ رابطه مربوط به جریان آبراهه‌ای است انتخاب شد و با به کارگیری نتایج آنها در روابط ۴ و ۵ و ایجاد ترکیب‌های گوناگون از آنها، IUH های مختلفی به دست آمد. هر ترکیب شامل یک رابطه جریان روزمینی و یک رابطه جریان آبراهه‌ای است. روابط منتخب در جدول شماره ۲ آمده است. هریک از روابط a, b, c با هریک از روابط f, g, h و ترکیب شد ولی رابطه d فقط با رابطه i و رابطه e فقط با رابطه j ترکیب شد زیرا این روابط را محققین به صورت نظیر یکدیگر ارائه و در مدل PGIUH استفاده کرده‌اند (جدول ۲).

جدول ۲: روابط زمان پیمایش روزمینی و آبراهه‌ای مورد استفاده در مدل PGIUH در این پژوهش

Travel-Time of Streamflow	Travel-Time of Overlandflow
a) Kirpich(1940): $T_s = 0,0663 \left(\frac{L_s^2}{S_s} \right)^{0,385}$ (6)	f) Kerby et al, (1959): $T_o = 1,4394 \left(\frac{n_o L_o}{\sqrt{S_o}} \right)^{0,467}$ (11)
b) Johnston – Cross(1949): $T_s = 0,0543 \left(\frac{L_s}{S_s} \right)^{0,5}$ (7)	g) NRCS(1986): $T_o = \frac{0,007(L_o n_o)^{0,8}}{P_{24}^{0,5} S_o^{0,4}}$ (12)
c) Bransby – Williams(1922): $T_s = 0,2426 \left(\frac{L_s}{4^{0,1} S_s^{0,2}} \right)$ (8)	h) Miller(1951): $T_o = 10,7 \left[\frac{L_o^{0,322} n_o}{(100 S_o)^{0,2}} \right]$ (13)
d) Gupta et al, (1980): $T_s = \gamma [\bar{L}_s]^{\frac{1}{3}}$ (9)	i) Gupta et al, (1980): $T_o = \gamma \left[\frac{A \pi_o}{2 L_o N_s} \right]^{\frac{1}{3}}$ (14)
e) Lee et al, (1997): $T_s = \frac{B_{si}}{2 i_e L_o} \left[\left[h_{coi}^m + \frac{2 i_e n_s \bar{L}_o \bar{L}_s}{S_s^{0,5} B_s} \right]^{\frac{1}{m}} - h_{coi} \right]$ (10)	j) Lee et al, (1997): $T_o = \left[\frac{\bar{L}_o n_o}{S_o^{0,5} i_e^{m-1}} \right]^{\frac{1}{m}}$ (15)

L_s = طول آبراهه، L_o = طول سطح، S_s = شیب آبراهه، S_o = شیب سطح، n_s = ضریب زبری آبراهه، n_o = ضریب زبری سطح، P_{24} = عمق باران 24 ساعته با دوره بازگشت 2 ساله، A = مساحت حوضه، π_o = احتمال وضعیت اولیه، N_s = تعداد آبراهه، γ = ضریب تجربی، B_{si} = عرض آبراهه رده i ، i_e = شدت بارش موثر، h_{coi} = عمق آب در ورودی آبراهه رده i ، $m = 5/3$.

با دانستن مقدار بارش موثر (P_{eff}) در هر ساعت از بارندگی (t) که پیش از این توضیح داده شد، ابعاد رواناب مستقیم برای هریک از IUH ها از طریق رابطه زیر به دست آمد (حسینی و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۰):

$$Q(t) = \sum_{i=t-m}^t P_{eff} \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^j p(s) \cdot C_{ij} e^{-K_{xi}t} \quad (16)$$

در نهایت به منظور تحلیل کمی نتایج شبیه سازی وقایع بارش - رواناب و مقایسه آنها با داده‌های مشاهداتی (جدول ۳)، معیارهای آماری شامل جذر میانگین مربعات خطا^۱ ($RMSE$)، ضریب کارایی^۲ (CE)، خطای برآورد دبی اوج (Eq_p)^۳ و خطای برآورد زمان وقوع دبی اوج (Et_p)^۴ مورد استفاده قرار گرفت:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2} \quad (17)$$

$$CE = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2 - \sum_{i=1}^n (Q_e - Q_o)^2]}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (18)$$

$$Eq_p = \frac{(Q_p)_e - (Q_p)_o}{(Q_p)_o} \times 100 \quad (19)$$

$$Et_p = (T_p)_e - (T_p)_o \quad (20)$$

Q_o = دبی مشاهداتی، Q_e = دبی تخمینی، \bar{Q}_o = میانگین دبی‌های مشاهداتی، $(Q_p)_o$ = دبی اوج مشاهداتی و $(Q_p)_e$ = دبی اوج تخمینی، $(T_p)_o$ = زمان وقوع دبی اوج مشاهداتی و $(T_p)_e$ = زمان وقوع دبی اوج تخمینی می‌باشد. برای یک پیش‌بینی کامل مقدار CE عدد یک است، مقادیر نزدیک به صفر و منفی نشان‌دهنده پیش‌بینی ضعیف هستند. همچنین مقادیر $RMSE$ ، Eq_p و Et_p در پیش‌بینی کامل، صفر و مقدار R^2 یک است (راگوانشی و همکاران، ۲۰۰۸، ۱۰۲۰). از طریق تحلیل کمی هیدروگراف‌ها، روابط زمان پیمایش و دقت و صحت محاسباتی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت و بهترین روابط جهت پیش‌بینی در حوضه مورد مطالعه مشخص گردید. خصوصیات ۱۰ واقعه بارش - رواناب در جدول شماره ۳ آمده است:

جدول ۳) ویژگی‌های هایتوگراف و هیدروگراف‌های ۱۰ واقعه منتخب در حوضه آبریز امامه

No	Date	Hyetograph			Hydrograph			
		Depth (mm)	(hour) Time	i_e (mm/hr)	Volume ($\times 10^3 m^3$)	Base-Time (hour)	Peak Discharge (m^3/s)	Time to Peak (hr)
1	89/01/29	18.3	3	0.14	16.07	7	1.44	2
2	92/05/19	38.6	8	0.87	261.49	8	30.85	3
3	88/11/30	14.2	2	0.12	8.44	4	2.15	2
4	88/08/12	21.5	3	0.28	31.39	10	4.13	1
5	90/06/03	30.9	9	0.07	25.31	9	1.95	2
6	90/01/17	16.4	4	0.22	33.41	11	2.2	2
7	90/01/16	22.8	6	0.06	13.39	9	1.16	2
8	88/11/15	14.3	7	0.07	18.77	8	1.68	2
9	89/02/09	13.4	5	0.18	33.95	8	2.43	5
10	88/08/27	32.5	11	0.06	26.54	11	1.89	1

1. Root mean square error

2. Coefficient of efficiency

3. Error of peak discharge estimation

4. Error of time to peak discharge estimation



شکل ۲: نمودار روش کار

یافته‌ها و تحلیل

نتایج مربوط به مقدار متوسط معیارهای خطای مدل PGIUH در شبیه‌سازی هیدروگراف وقایع بارش-رواناب منتخب که بر اساس ترکیب روابط تخمینگر زمان پیمایش جریان‌های روزمینی و آبراهه‌ای به دست آمده‌اند در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول هر ترکیب با استفاده از دو حرف الفبا مشخص شده که اولین حرف نماینده یکی از روابط زمان پیمایش جریان آبراهه‌ای و دومین حرف نماینده یکی از روابط زمان پیمایش جریان روزمینی است (به جدول شماره ۲ رجوع شود). نتایج کار به شرح زیر است:

الف) عدم تاثیر زمان پیمایش جریان روزمینی بر هیدروگراف خروجی

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که ترکیب یک رابطه زمان پیمایش آبراه‌های خاص با چند رابطه زمان پیمایش جریان روزمینی نتایج متفاوتی نشان نمی‌دهد (به عنوان مثال ترکیب های a,g, a,f و a,h). این بدان معنی است که مدل GIUH در حوضه امامه به جریان روزمینی حساس نیست و این در حالی است که هر یک از روابط فوق در شرایط یکسان زمان‌های پیمایش روزمینی متفاوتی ارائه داده است. مثلاً با فرض زبری ۰/۰۵ نتایج حاصل از روابط کربای و همکاران (f), NRCS (g) و میلر (h) (جدول ۲) برای سطوح رده‌های مختلف در جدول شماره ۵ آمده است. همچنین اگر معیارهای آماری را برای هر یک از وقایع بارش-رواناب به طور جداگانه در نظر بگیریم، در صورت انتخاب زبری‌های مختلف برای سطوح جریان روزمینی تفاوت معنی‌داری در نتایج آماری دیده نمی‌شود. به عنوان نمونه، نتایج حاصل از ترکیب روابط a,f و ارزیابی آن با واقعه تاریخ ۸۹/۰۱/۲۹ برای زبری‌های ۰/۰۳۵ و ۰/۰۷ در جدول شماره ۶ آورده شده است.

جدول ۴: مقادیر متوسط نتایج معیارهای نکویی برازش هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل PGIUH بر اساس ترکیب روابط تخمینگر زمان پیمایش جریان روزمینی و آبراه‌های

ترکیب روابط	R^2 (-)	RMSE (m^3/s)	CE (-)	Eq_p (%)	Et_p (hr)
a,f	0.35	1.54	-1.44	76.89	-0.8
a,g	0.35	1.54	-1.43	76.77	-0.8
a,h	0.36	1.52	-1.36	77.02	-0.8
b,f	0.23	2.19	-3.99	131.75	-0.8
b,g	0.23	2.18	-3.98	131.57	-0.8
b,h	0.23	2.19	-4	131.92	-0.8
c,f	0.66	0.9	0.63	-25.31	-0.8
c,g	0.66	0.9	0.64	-25.73	-0.8
c,h	0.66	0.9	0.63	-24.58	-0.8
d,i ($\gamma=0.2$)	0.22	2.29	-4.33	137.85	-0.8
d,i ($\gamma=0.3$)	0.3	1.67	-1.85	17.83	-0.8
d,i ($\gamma=0.4$)	0.48	1.24	-0.19	34.95	-0.8
d,i ($\gamma=0.5$)	0.62	1.02	0.47	-0.13	-0.8
d,i ($\gamma=0.6$)	0.71	0.89	0.65	-12.67	0.1
d,i ($\gamma=0.7$)	0.72	0.86	0.7	-23.37	0.2
d,i ($\gamma=0.8$)	0.7	0.9	0.68	-33.29	0.2
e,j (nc=0.055)	0.54	1.28	0.05	30.86	-0.8

a =Kirpich , b =Johnston-Cross , c=Bransby-Williams , d=Gupta et al , e=Lee et al , f=Kirby et al
g=NRCS , h=Miller , i=Gupta et al , j=Lee et al.

مقادیر منفی پیش بینی شده وقوع دبی اوج (Et_p) نشاندهنده متوسط زمان (به ساعت) تخمین زودتر نسبت به دبی اوج مشاهده ای و مقادیر مثبت نشاندهنده متوسط زمان تخمین با تاخیر نسبت به دبی اوج مشاهده ای برای ۱۰ هیدروگراف منتخب است

جدول ۵: زمان‌های پیمایش جریان روزمینی محاسبه شده با استفاده از تعدادی از روابط برای رده‌های مختلف (با فرض ضریب زبری سطوح مانینگ ۰/۰۵)

Overland Flow Order	Kerby et al (minute)	NRCS (minute)	Miller (minute)
1	3.44	4.48	1.1
2	3.05	3.65	1
3	3.01	3.57	1
4	4.01	5.84	1.22
5	3.86	5.46	1.19

جدول ۶: نتایج آماری مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده تاریخ ۱۳۸۹/۰۱/۲۹ توسط مدل PGIUH با استفاده از ترکیب a,f با فرض زبری‌های ۰/۰۳۵ و ۰/۰۷

n	(-)R ²	RMSE (m ³ /s)	CE (-)	Eq _p (%)	Et _p (hr)
0.035	0.28	0.65	-0.77	93.07	-1
0.07	0.28	0.65	-0.77	92.97	-1

عدم حساسیت هیدروگراف‌های پیش‌بینی شده به زمان پیمایش جریان روزمینی ناشی از کوتاهی طول سطوح که نسبت معکوس با تراکم شبکه زهکشی دارد و زمان پیمایش کوتاه جریان آب بر روی آنها است (جدول ۱ و ۵) در واقع آنچه باعث تفاوت در نتایج آماری جدول ۴ شده است تفاوت در محاسبه مقدار زمان پیمایش در آبراهه‌ها و به خصوص آبراهه اصلی است. این بدان معنی است که زمان پیمایش جریان روزمینی سهم ناچیزی در زمان تمرکز کل حوضه و نیز در مجموع زمان‌های پیمایش جریان‌های روزمینی و آبراهه‌ای در هریک از مسیرهای تعریف شده (S) در مدل دارد. یادآوری می‌شود هر مسیر S در حوضه مورد مطالعه از یک سطح روزمینی و تعدادی آبراهه رده‌های مختلف تشکیل شده که در فرمول شماره ۳ به صورت احتمال انتخاب مسیر قطره آب به کار می‌رود بنابراین نسبت سطح به مجموع آبراهه‌های هر مسیر به طور طبیعی کوچک است و چنانچه سطح کوتاه باشد، زمان پیمایش بر روی آن اندک و نسبت به زمان پیمایش مجموع آبراهه‌های رده‌های مختلف ناچیز است و تاثیر ناچیزی بر هیدروگراف واحد لحظه‌ای حاصل از فرمول شماره ۲ و در نتیجه هیدروگراف سیل خواهد داشت. به طور مثال طبق فرمول ۳ از بین ۱۶ مسیری که قطره آب طی می‌کند تا به خروجی حوضه برسد (مسیرها و مقادیر احتمال عبور قطره آب از آنها به دلیل اختصار در این نوشتار نیامده است) محتمل‌ترین مسیر (احتمال ۰/۱۶) به صورت $S_1 - S_2 - S_3 - S_5 - O_1$ - تعریف می‌شود یعنی قطره آب با احتمال ۱۶٪ از سطح رده ۱ (O_1) به آبراهه‌های رده ۱ (S_1)، ۲ (S_2)، ۳ (S_3)، ۵ (S_5) منتقل می‌شود. حال اگر این مسیر را انتخاب و زمان پیمایش قطره آب بروی سطح را مثلاً از طریق رابطه NRCS و زمان پیمایش آبراهه‌ها را از طریق رابطه کریچ (که به عنوان نمونه در جدول ۵ آورده شده است) محاسبه (جدول ۵) و جمع کنیم، زمان پیمایش مجموع مسیر ۷۵/۳ دقیقه خواهد بود که ۴/۴۸ آن مربوط به سطح است یعنی حدود ۰/۰۶ مجموع زمان پیمایش مسیر منتخب که مقدار ناچیزی است. این مساله نافی تاثیر قاطع سطوح بر مقدار رواناب تولیدی و انتقال آن به آبراهه اصلی که خود بر سرعت جریان آب در آبراهه تاثیر می‌گذارد نیست.

ب) تحلیل نتایج آماری بکارگیری روابط مختلف زمان پیمایش آبراهه‌ای

به طور کلی روابط زمان پیمایش آبراهه‌ای و از جمله آنهایی که در این در این نوشتار مورد استفاده قرار گرفته‌اند را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد:

۱- روابط مبتنی بر خصوصیات مورفولوژیکی: در این روابط پیش‌بینی زمان پیمایش آبراهه از طریق پارامترهای مورفولوژیکی مانند شیب آبراهه، طول آبراهه و وسعت حوضه زهکشی انجام می‌گیرد. روابط مورد استفاده در این نوشتار شامل کریبیچ (a)، جانستون - کراس (b) و برنسبای - ویلیامز (c) است (جدول ۲). با توجه به ثابت بودن پارامترهای فوق برای هر آبراهه یک عدد ثابت به عنوان زمان پیمایش به دست می‌آید (جدول ۷):

جدول ۷: زمان پیمایش آبراهه‌های رده‌های مختلف با استفاده از روابط مربوط به گروه ۱ (حروف a, b و c طبق جدول ۲ است)

Order	Kirpich (minute) (a)	Johnston-Cross (minute) (b)	Bransby-Williams (minute) (c)
1	1.6	2.38	4.5
2	2.7	3.47	7.26
3	5.57	5.61	15.71
4	10.14	10.64	22.18
5	60.95	33.19	181.58

نتایج آماری مدل با استفاده از رابطه a برای وقایع گوناگون در جدول شماره ۸ ارائه شده است (شماره‌گذاری وقایع طبق جدول ۳):

جدول ۸: نتایج آماری مدل با استفاده از رابطه a برای ۱۰ واقعه (وقایع بر اساس مقدار دبی اوج مرتب شده است. شماره وقایع طبق جدول ۳ است)

Event No.	Qpeak (m ³ /s)	CE (-)	RMSE (m ³ /s)	(%)Eq _p	Et _p (hr)
2	30.85	0.26	7.46	-17.88	1
4	4.13	0.85	0.48	31.81	0
9	2.43	-5.14	2.35	139.76	-4
6	2.2	-3.69	1.53	162.04	-1
3	2.15	-0.06	0.61	-24.61	-1
5	1.95	-2.6	1.26	126.23	-1
10	1.89	-0.21	0.63	67.24	1
8	1.68	-1.27	0.84	92.28	-1
1	1.44	-0.77	0.65	93.02	-1
7	1.16	-1.82	0.64	99.05	-1

در جدول ۸ ضعیف‌ترین مقدار پارامتر CE (۵/۱۴ -) به واقعه شماره ۹ با دبی اوج ۲/۴۳ متر مکعب ثانیه و بهترین مقدار CE (۰/۸۵) به واقعه ۴ با دبی اوج ۴/۱۳ متر مکعب در ثانیه مربوط است. ضعیف‌ترین مقدار پارامتر RMSE (۷/۴۶) به واقعه ۲ با دبی اوج ۳۰/۸۵ متر مکعب و بهترین مقدار RMSE (۰/۴۸) به واقعه ۴ مربوط است. ضعیف‌ترین مقدار Eq_p (۱۶۲/۰۴٪) به واقعه ۶ با دبی اوج ۲/۲ متر مکعب در ثانیه و بهترین مقدار Eq_p (۱۷/۸۸ -٪) به واقعه ۲ مربوط است. همچنین ضعیف‌ترین مقدار Et_p (۴- ساعت) به واقعه ۹ و بهترین مقدار Et_p (۰) به واقعه ۴ مربوط است. طبق این جدول واقعه ۴ بهترین نتیجه را به دست داده است. این واقعه دومین دبی اوج را در بین وقایع منتخب داراست (۴/۱۳ متر مکعب در ثانیه) و معیارهای RMSE و CE و Etp بهترین مقادیر را نسبت به سایر وقایع دارا هستند. همچنین این رابطه از لحاظ معیار Eq_p برای واقعه ۲ بهترین نتیجه را به دست داده است. این واقعه بیشترین مقدار رواناب و بیشترین دبی اوج را ایجاد کرده است. بنابراین بهترین نتایج آماری رابطه a به دو واقعه پرشدت حوضه تعلق می‌گیرد.

نتایج آماری مدل با استفاده از رابطه b برای وقایع گوناگون در جدول شماره ۹ ارائه شده است:
 جدول ۹: نتایج آماری مدل با استفاده از رابطه b برای ۱۰ واقعه (وقایع بر اساس مقدار دبی اوج مرتب شده است. شماره وقایع طبق جدول ۳ است)

Event No.	Qpeak (m ³ /s)	CE (-)	RMSE (m ³ /s)	(%)Eq _p	Et _p (hr)
2	30.85	0.03	8.55	2.47	1
4	4.13	0.21	1.08	75.72	0
9	2.43	-9.02	3.01	219.62	-4
6	2.2	-8.22	2.14	249.33	-1
3	2.15	-0.77	0.94	0.5	-1
5	1.95	-6.3	1.8	201.59	-1
10	1.89	-1.26	0.87	89.21	1
8	1.68	-4.18	1.27	156.38	-1
1	1.44	-5.42	1.28	157.32	-1
7	1.16	-4.94	0.92	165.35	-1

در جدول ۹ ضعیف‌ترین مقدار پارامتر CE (۹/۰۲-) به واقعه شماره ۹ با دبی اوج ۲/۴۳ متر مکعب در ثانیه و بهترین مقدار CE (۰/۲۱) به واقعه ۴ با دبی اوج ۴/۱۳ متر مکعب در ثانیه مربوط است. ضعیف‌ترین مقدار پارامتر RMSE (۸/۵۵) به واقعه ۲ با دبی اوج ۳۰/۸۵ متر مکعب و بهترین مقدار RMSE (۰/۸۷) به واقعه ۱۰ با دبی اوج ۱/۸۹ متر مکعب در ثانیه مربوط است. ضعیف‌ترین مقدار Eq_p (۲۴۹/۳۳٪) به واقعه ۶ با دبی اوج ۲/۲ متر مکعب در ثانیه و بهترین مقدار Eq_p (۰/۵٪) به واقعه ۳ با دبی اوج ۲/۱۵ متر مکعب در ثانیه مربوط است. همچنین ضعیف‌ترین مقدار Et_p (-۴ ساعت) به واقعه ۹ و بهترین مقدار Et_p (۰) به واقعه ۴ مربوط است. از لحاظ معیار RMSE واقعه ۱۰، از لحاظ معیار CE واقعه ۴ و از لحاظ معیار Eq_p واقعه ۳ بهترین نتایج را ارائه داده‌اند.
 نتایج آماری مدل با استفاده از رابطه c برای وقایع گوناگون در جدول شماره ۱۰ ارائه شده است:

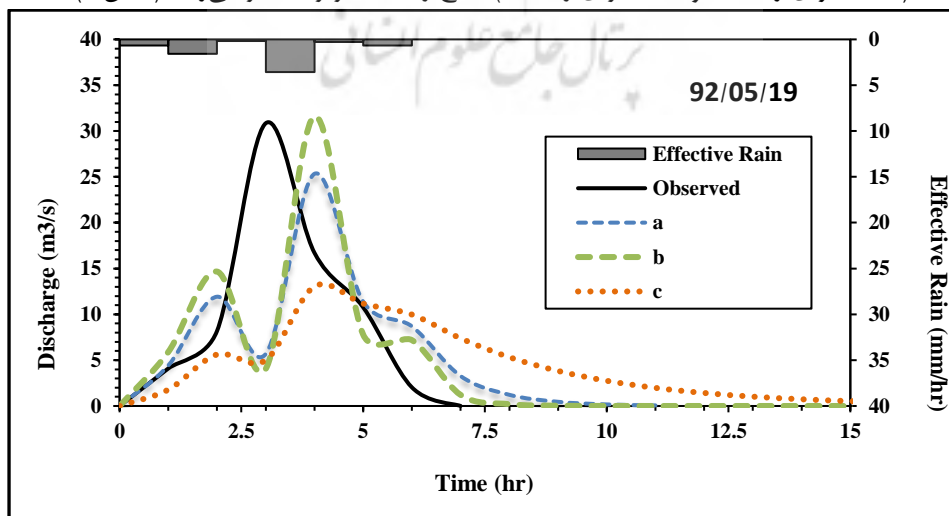
جدول ۱۰: نتایج آماری مدل با استفاده از رابطه c برای ۱۰ واقعه (وقایع بر اساس دبی اوج مرتب شده است. شماره وقایع طبق جدول ۳ است)

Event No.	Qpeak (m ³ /s)	CE (-)	RMSE (m ³ /s)	(%)Eq _p	Et _p (hr)
2	30.85	0.28	6.02	-57.65 (9)	1
4	4.13	0.78	0.46	-46.67(8)	0
9	2.43	0.22	0.75	-3.01 (1)	-4
6	2.2	0.75	0.34	6.02 (2)	-1
3	2.15	0.29	0.4	-69.5 (10)	-1
5	1.95	0.78	0.28	-8.47 (3)	-1
10	1.89	0.81	0.24	-10.2 (4)	1
8	1.68	0.86	0.18	-22.25 (7)	-1
1	1.44	0.76	0.21	-21.91 (6)	-1
7	1.16	0.81	0.14	-19.47 (5)	-1

در جدول ۱۰ ضعیف‌ترین مقدار پارامتر CE (۰/۲۲) به واقعه شماره ۹ با دبی اوج ۲/۴۳ متر مکعب در ثانیه و بهترین مقدار CE (۰/۸۶) به واقعه ۸ با دبی اوج ۱/۶۸ متر مکعب در ثانیه مربوط است. ضعیف‌ترین مقدار پارامتر RMSE

(۶/۰۲) به واقعه ۲ با دبی اوج ۳۰/۸۵ متر مکعب و بهترین مقدار RMSE (۰/۱۴) به واقعه ۷ با دبی اوج ۱/۱۶ متر مکعب در ثانیه مربوط است. ضعیف‌ترین مقدار Eq_p (۶۹/۵ - %) به واقعه ۳ با دبی اوج ۲/۱۵ متر مکعب در ثانیه و بهترین مقدار Eq_p (۳/۰۱ - %) به واقعه ۹ با دبی اوج ۲/۴۳ متر مکعب در ثانیه مربوط است. همچنین ضعیف‌ترین مقدار Et_p (۴- ساعت) به واقعه ۹ و بهترین مقدار Et_p (۰) به واقعه ۴ مربوط است. بنابراین از لحاظ معیار RMSE واقعه ۷، از لحاظ معیار CE واقعه ۸ و از لحاظ معیار Eq_p واقعه ۹ بهترین نتایج را ارائه داده‌اند.

چنانچه وقایع منتخب را به سه دسته پرشدت (واقعه ۲ با دبی اوج بیش از ۳۰ متر مکعب در ثانیه)، متوسط (با دبی اوج ۴ متر مکعب در ثانیه) و کم شدت (سایر وقایع با دبی اوج کمتر از ۲/۵ متر مکعب در ثانیه) تقسیم کنیم مشاهده می‌شود که رابطه b که زمان پیمایش سریعی دارد (زمان پیمایش آبراهه اصلی = ۳۳/۱۹ دقیقه طبق جدول ۷) دبی اوج واقعه ۲ را بهتر پیش‌بینی کرده است (خطای برآورد دبی اوج = ۲/۴۷ % جدول ۹)، رابطه a که زمان پیمایش متوسطی دارد (زمان پیمایش آبراهه اصلی = ۶۰/۹۵ دقیقه طبق جدول ۷) دبی اوج واقعه ۴ را بهتر پیش‌بینی کرده است (خطای برآورد دبی اوج = ۳۱/۸۱ % جدول ۸) و رابطه c که زمان پیمایش طولانی‌تری دارد (زمان پیمایش آبراهه اصلی = ۱۸۱/۵۸ دقیقه طبق جدول ۷) دبی اوج سایر وقایع را بهتر پیش‌بینی کرده است (متوسط خطای برآورد دبی اوج = ۱۸/۶ - % جدول ۱۰) که نشان‌دهنده تاثیر سرعت متغیر جریان آب آبراهه بر دبی اوج است. همچنین رابطه a از لحاظ معیار آماری CE نیز در تخمین هیدروگراف واقعه ۴ بر رابطه c برتری دارد (۰/۸۵ برای رابطه a و ۰/۷۸ برای رابطه c به ترتیب طبق جداول ۸ و ۱۰) و از لحاظ معیار RMSE تقریباً مساوی هستند (۰/۴۸ برای رابطه a و ۰/۴۶ برای رابطه c به ترتیب طبق جداول ۸ و ۱۰). ضعیف بودن تخمین هیدروگراف واقعه ۲ به وسیله رابطه b از لحاظ معیارهای CE (۰/۰۳) و RMSE (۸/۵۵) که در واقع معیارهای قیاس میزان شباهت فرم هیدروگراف تخمینی به مشاهده‌ای هستند به دلیل خطای تخمین زمان رسیدن به اوج (Et_p) است به طوری که هر سه رابطه این زمان را با یک ساعت تاخیر پیش‌بینی کرده‌اند (جداول ۸، ۹ و ۱۰) اما مقایسه هیدروگراف‌های حاصل از سه رابطه مذکور نشان‌دهنده مناسب بودن تخمین حاصل از رابطه b و شباهت آن با فرم هیدروگراف مشاهده‌ای است به طوری که چنانچه از معیار خطای تخمین دبی اوج (Et_p) صرف‌نظر شود، دبی اوج، شیب بازوها و فرم کل هیدروگراف با داده‌های مشاهداتی شباهت دارد و نسبت به نتیجه حاصل از بکارگیری رابطه c مناسب‌تر است در صورتی که از لحاظ معیارهای آماری CE (۰/۰۳) برای رابطه b و ۰/۲۸ برای رابطه c و RMSE (۸/۵۵ برای رابطه b و ۶/۰۲ برای رابطه c) نتایج رابطه c برتر به نظر می‌رسد (شکل ۳).

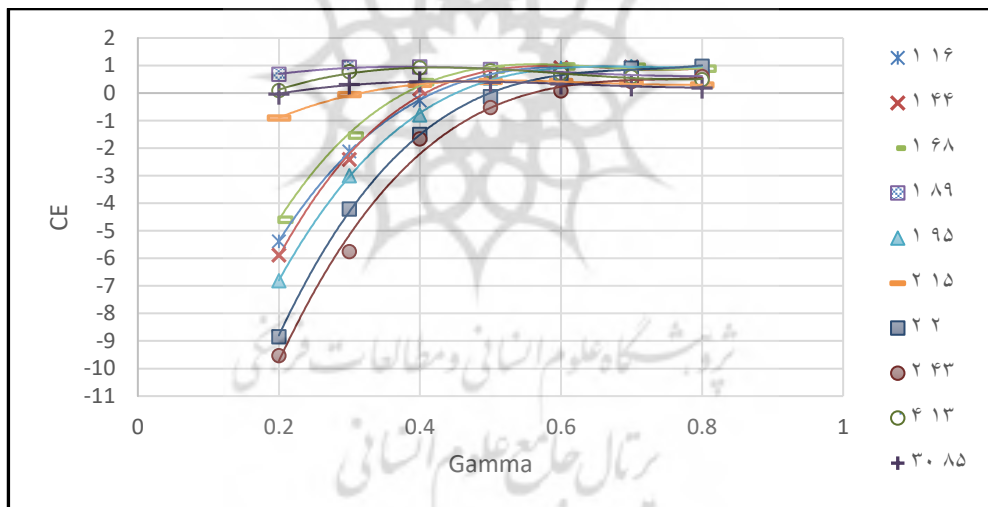


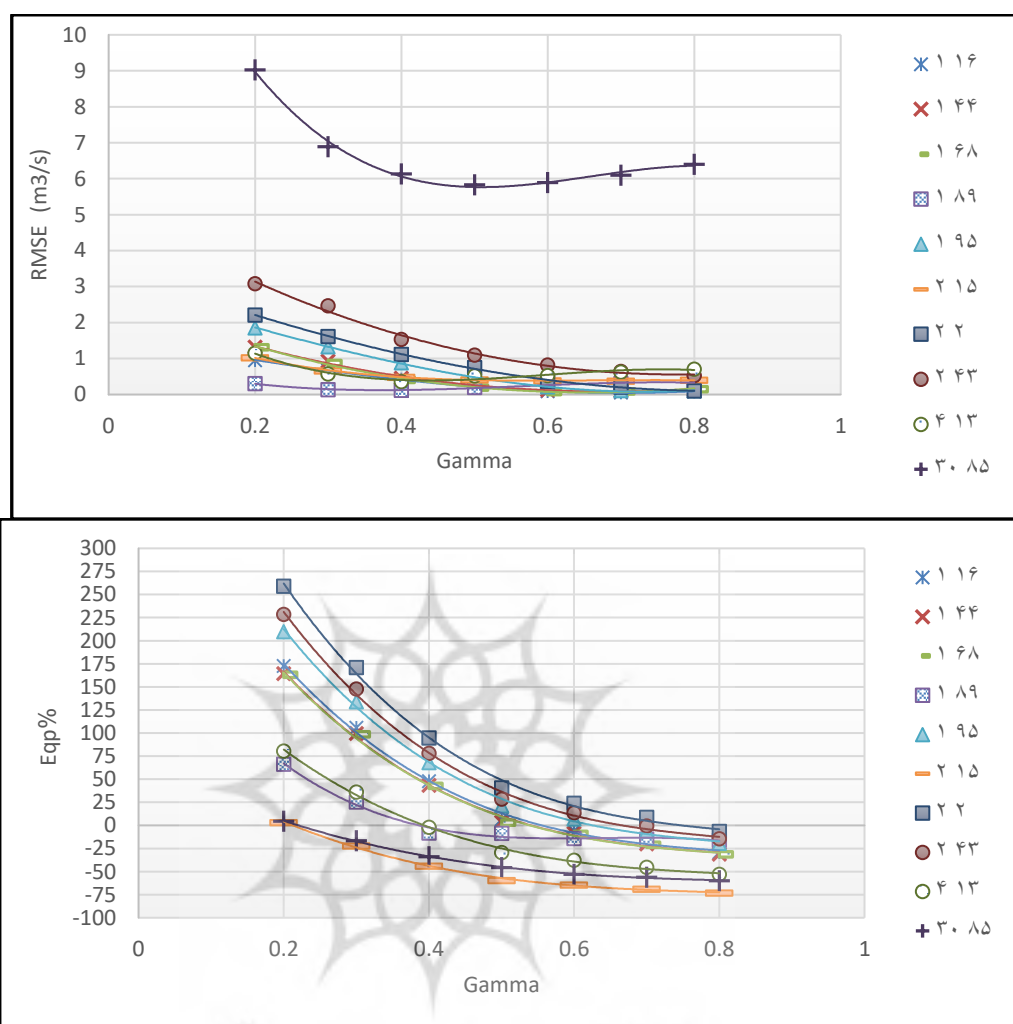
شکل ۳: تخمین هیدروگراف واقعه ۲ به وسیله روابط a، b و c

در مجموع در بین روابط گروه اول (روابط مبتنی بر خصوصیات مورفولوژیکی) میانگین نتایج رابطه c بسیار بهتر از روابط a و b بوده است (جدول ۴). چون دبی جریان = سطح مقطع جریان * سرعت جریان و زمان پیمایش معکوس سرعت است بنابراین هرچه زمان پیمایش بیشتر باشد دبی کمتر و هیدروگراف حاصل ملایم‌تر و با دبی اوج کمتر خواهد بود. با توجه به اینکه بیشتر وقایع از بین ۱۰ مورد، دبی اوج کمتری داشته‌اند، متوسط نتایج با استفاده از رابطه c که زمان پیمایش طولانی‌تری داشته است بهتر بوده است. اما تعدادی از وقایع با روابط a و b که دارای زمان پیمایش کوتاه‌تری بوده‌اند بهتر تخمین زده شده‌اند چون دارای هیدروگراف تندتر و با دبی اوج بالاتری بوده‌اند (واقعه متوسط ۴ توسط رابطه a با توجه به معیارهای آماری CE و Eq_p که در سطور قبل تشریح شد و واقعه شدید ۲ توسط رابطه b با توجه به شکل ۳ صرفنظر از پارامتر Et_p بهتر تخمین زده شده‌اند).

۲- روابط مبتنی بر ضرایب تجربی:

در اینگونه روابط ضرایب تجربی جایگزین تعدادی از پارامترها می‌شوند. رابطه مورد استفاده در این نوشتار رابطه گوبتا و همکاران (d جدول ۲) است که دارای ضریب تجربی گاما (γ) است. این ضریب ویژگی‌های مرتبط با شدت بارش، شیب و زبری را منعکس می‌سازد و نیازمند واسنجی است (حسینی و همکاران، ۲۰۱۵، ۴) در این نوشتار گاماهای ۰/۲ الی ۰/۸ واسنجی شد تا مشخص شود کدامیک بهترین تخمین‌ها را ارائه می‌دهد. نمودارهای روابط رگرسیون بین مقدار گاما و معیارهای آماری CE، RMSR و Eq_p برای ۱۰ واقعه در شکل ۴ آمده است:





شکل ۴: نمودارهای روابط بین پارامترهای آماری CE ، $RMSE$ و Eq_p با مقدار گاما (اعداد کنار نمودار دبی اوج هر واقعه بر حسب متر مکعب در ثانیه هستند)

طبق شکل ۴ سه الگو در روند رابطه بین گاما و معیارهای آماری برای وقایع مختلف دیده می‌شود. در گروه یک بهترین معیارهای آماری غالباً با گاماهای ۰/۲ الی ۰/۵ که زمان پیمایش کمتری دارند به دست می‌آید و در گروه دو این نتیجه برای گاماهای ۰/۶ الی ۰/۸ که زمان پیمایش طولانی‌تری دارند حاصل می‌شود و در گروه سوم بهترین نتایج آماری در هر دو طیف گاما توزیع شده است (شکل ۴ و جدول ۱۲). جدول ۱۲ بهترین نتایج هر یک از پارامترهای آماری را برای هر یک از وقایع به همراه گامای بهینه آن پارامتر آماری نشان می‌دهد. طبق این جدول و با توجه به میانگین گاماهای معیارهای آماری مختلف، واقعه پرشدت ۲، واقعه متوسط ۴ و واقعه کم شدت ۱۰ در گروه یک قرار می‌گیرند. واقعه کم شدت ۳ در گروه سه و در مرز بین دو گروه قرار می‌گیرد و و سایر وقایع کم شدت در گروه ۲ جای می‌گیرند.

جدول ۱۲: بهترین نتایج معیارهای مختلف آماری برای هریک از وقایع (گامای بهینه هر پارامتر آماری در پرانتز نشان داده شده است. وقایع بر اساس دبی اوج مرتب شده است. همچنین شماره وقایع طبق جدول ۳ است)

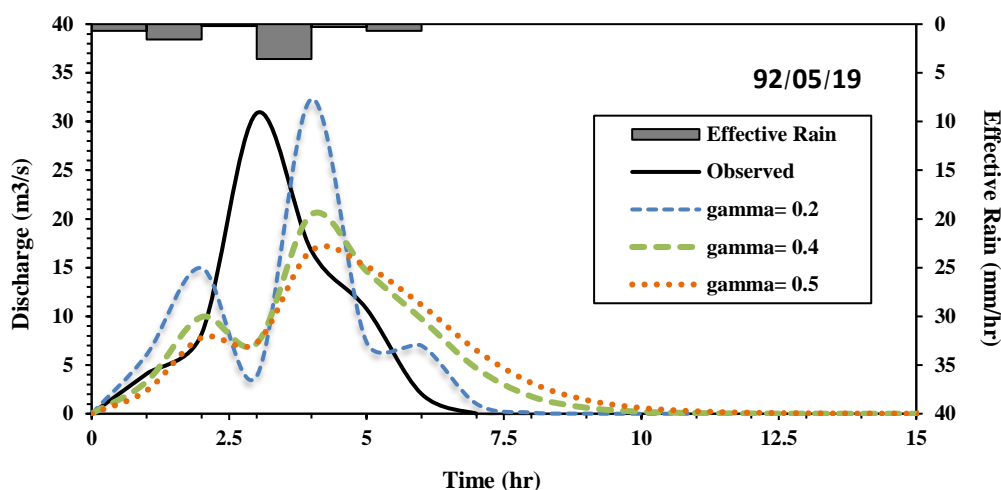
Event No.	Qpeak (m ³ /s)	CE (-)	RMSE (m ³ /s)	Eq _p (%)	(hr) Et _p	mean
2	30.85	0.41 (0.4)	5.84 (0.5)	4.69 (0.2)	1 (0.2, 0.3, 0.4, 0.5)	0.36
4	4.13	0.91 (0.4)	0.36 (0.4)	-2.03 (0.4)	0 (0.2, 0.3, 0.4, 0.5)	0.37
9	2.43	0.6 (0.8)	0.53 (0.8)	-0.54 (0.7)	-3 (0.6, 0.7, 0.8)	0.73
6	2.2	0.98 (0.8)	0.1 (0.8)	-6.4 (0.8)	0 (0.6, 0.7, 0.8)	0.75
3	2.15	0.42 (0.5)	0.38 (0.7)	3.31 (0.2)	0 (0.6, 0.7, 0.8)	0.58
5	1.95	0.97 (0.7, 0.8)	0.11 (0.7, 0.8)	-6.16 (0.7)	0 (0.6, 0.7, 0.8)	0.72
10	1.89	0.95 (0.4)	0.12 (0.4)	-8.19 (0.4)	0 (0.2, 0.3)	0.34
8	1.68	0.98 (0.6)	0.07 (0.6)	3.26 (0.5)	0 (0.6, 0.7, 0.8)	0.63
1	1.44	0.94 (0.7)	0.1 (0.7)	3.64 (0.5)	0 (0.6, 0.7, 0.8)	0.67
7	1.16	0.97 (0.7)	0.06 (0.7)	-5.66 (0.6)	0 (0.6, 0.7, 0.8)	0.68

نکته مهم این است که دبی اوج واقعه ۲ (شدیدترین واقعه) توسط گامای ۰/۲ (سریعترین زمان پیمایش) و دبی اوج واقعه ۴ (دومین واقعه شدید) به وسیله گامای ۰/۴ بهتر تخمین زده شده‌اند. زمان پیمایش آبراهه‌های رده‌های مختلف برای گاماهای مختلف در جدول ۱۳ ارائه شده است:

جدول ۱۳: زمان پیمایش آبراهه‌های رده‌های مختلف با استفاده از گاماهای مختلف (زمان‌ها به دقیقه می‌باشد)

Order	Gamma						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
1	6.73	10.09	13.46	16.82	20.19	23.55	26.92
2	8.22	12.33	16.44	20.55	24.67	28.78	32.89
3	11.17	16.76	22.34	27.93	33.52	39.1	44.69
4	12.25	18.38	24.5	30.63	36.75	42.88	49
5	27.12	40.69	54.25	67.81	81.38	94.94	108.5

نتایج ضعیف گامای ۰/۲ در برآورد فرم هیدروگراف از طریق معیارهای CE (۰/۳-) و RMS (۹/۰۳) (شکل ۴) به دلیل تاخیر یک ساعته در برآورد دبی اوج برای این واقعه است (جدول ۱۲). در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود که بهترین مقدار CE برای واقعه ۲ (۰/۴) متعلق به گامای ۰/۴ و بهترین مقدار RMSE برای همان واقعه (۵/۸۴) به گامای ۰/۵ مربوط است. اما مقایسه هیدروگراف‌های حاصل از سه گامای مذکور نشان‌دهنده مناسب بودن تخمین حاصل از ۰/۲ و شباهت آن با فرم هیدروگراف مشاهده‌ای است به طوری که چنانچه از معیار خطای تخمین دبی اوج (Et_p) صرف‌نظر شود، دبی اوج، شیب بازوها و فرم کل هیدروگراف با داده‌های مشاهداتی شباهت دارد و نسبت به نتیجه حاصل از بکارگیری رابطه ۰/۴ و ۰/۵ مناسب‌تر است (شکل ۵). همچنین مشاهده می‌شود که گامای ۰/۴ که در برآورد واقعه ۴ تاخیر ایجاد نکرده است علاوه بر دبی اوج سایر پارامترهای آماری را هم بسیار خوب تخمین زده است (جدول ۱۲).



شکل ۶: تخمین هیدروگراف واقعه ۲ با استفاده از رابطه d با گاماهای ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۵

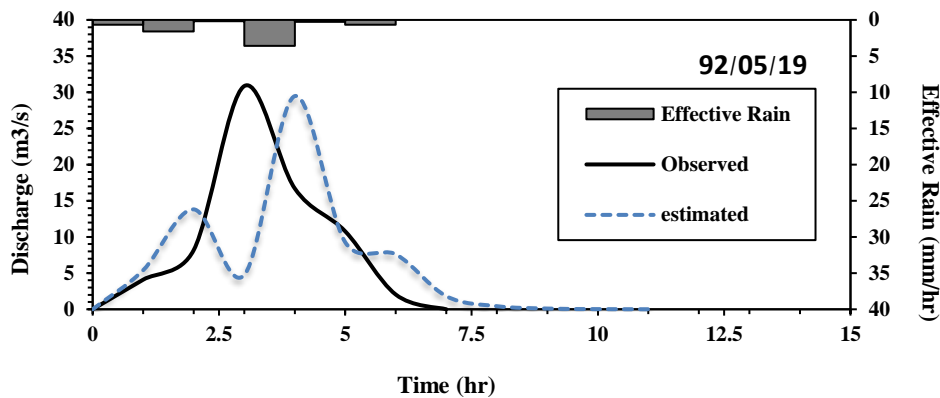
با توجه به اینکه بیشتر وقایع منتخب ملایم و دارای دبی اوج پایین هستند، متوسط نتایج آماری گاماهای ۰/۶ الی ۰/۸ بهتر از سایر گاماها و همچنین بهتر از سایر روابط مورد استفاده در این نوشتار بوده است (جدول ۴) -۲ روابط دارای پارامتر فرآیندی:

این روابط علاوه بر پارامترهای مورفولوژیکی از پارامترهای مرتبط با ویژگی‌های بارش یا رواناب استفاده می‌کنند. رابطه مورد استفاده در این نوشتار رابطه لی و همکاران (۱۹۹۷) (e) (جدول ۲) است که از پارامتر شدت بارش موثر بهره می‌برد. شدت بارش موثر برای هر بارندگی متفاوت است ازین رو زمان پیمایش هر بارندگی نیز متفاوت خواهد بود. نتایج آماری ده واقعه در جدول ۱۴ آمده است:

جدول ۱۵: نتایج آماری مدل با استفاده از رابطه e برای ۱۰ واقعه (وقایع بر اساس دبی اوج مرتب شده است. شماره وقایع طبق جدول ۳ است)

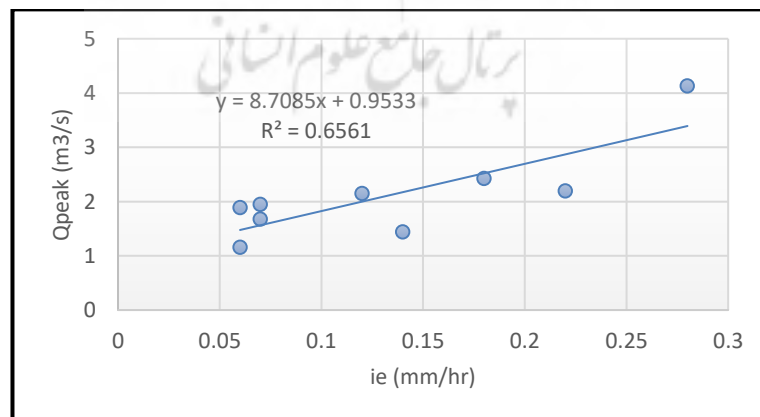
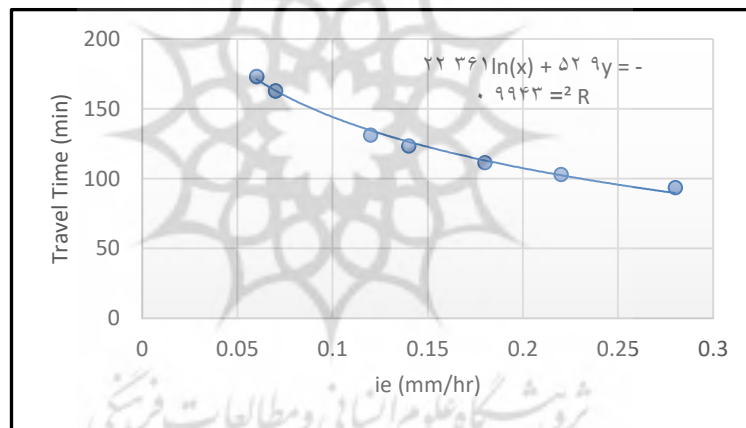
Event No.	ie (mm/hr)	Qpeak (m ³ /s)	CE (-)	RMSE (m ³ /s)	(%)Eq _p	Et _p (hr)
2	0.87	30.85	0.16	7.8	-4.55	1
4	0.28	4.13	0.9	0.38	24.28	0
9	0.18	2.43	-1.46	1.38	97.68	-4
6	0.22	2.2	-2.43	1.31	130.3	-1
3	0.12	2.15	0.25	0.44	-45.44	-1
5	0.07	1.95	0.52	0.42	31.71	-1
10	0.06	1.89	0.76	0.27	15.91	1
8	0.07	1.68	0.81	0.21	9.03	-1
1	0.14	1.44	0.25	0.39	45.78	-1
7	0.06	1.16	0.74	0.17	3.91	-1

در مجموع میانگین نتایج آماری رابطه e بهتر از روابط a و b و d (گاماها ۰/۲ و ۰/۳) و ضعیف‌تر از روابط c و d (گاماها ۰/۵ الی ۰/۸) و تقریباً مساوی با رابطه d (گاما ۰/۴) بوده است (جدول ۴). طبق جدول ۱۴ بهترین وقایعی که توسط این رابطه تخمین زده شده است شامل وقایع کم شدت ۷ (کم شدت‌ترین واقعه)، ۸ و ۱۰، واقعه متوسط ۴ (دومین واقعه پر شدت) است. همچنین از لحاظ معیار Eq_p واقعه ۲ (پر شدت‌ترین واقعه) خوب تخمین زده شده است. ضعف تخمین واقعه ۲ از لحاظ معیارهای CE و RMSE به دلیل تاخیر یک ساعته در تخمین زمان دبی اوج بوده است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که به صورت بصری نیز صرف‌نظر از خطای زمان تاخیر دبی اوج، شیب بازوها، فرم کلی و دبی اوج واقعه ۲ به گونه مناسبی تخمین زده شده‌اند.



شکل ۷: تخمین هیدروگراف واقعه ۲ با استفاده از رابطه e

با توجه به موارد فوق هم شدیدترین وقایع و هم کم شدت‌ترین آنها در بین بهترین تخمین‌های رابطه e هستند. دلیل آن استفاده از پارامتر شدت بارش موثر است که برای هر واقعه متغیر است و با دبی اوج وقایع رابطه مستقیم و با مجموع زمان پیمایش رده‌های مختلف آبراهه‌ها برای هر واقعه رابطه معکوس دارد (شکل ۸):



شکل ۸: نمودار همبستگی بین شدت بارش موثر (ie) و مجموع زمان پیمایش آبراهه‌های رده‌ها (بالا) و بین شدت بارش موثر و دبی اوج (Qp) (پایین)

رابطه e علیرغم استفاده از پارامترهای متعدد از جمله عرض آبراهه‌ها و ضریب زبری آبراهه‌ها، ضعیف پیش‌بینی مشهودی دارد که در متوسط نتایج آماری (جدول ۴) و در نیمی از وقایع (جدول ۱۳) دیده می‌شود که می‌تواند به دلایل زیر باشد:

- ۱- خطا در تخمین مقدار عرض آبراهه اصلی در محل خروجی حوضه که از طریق Google Earth مقدار آن حدود ۱/۵ متر اندازه‌گیری شده است
- ۲- تغییر و یا خطا در تخمین ضریب زبری مانینگ آبراهه اصلی که براساس مطالعات گیاهی (۱۳۷۵) مقدار آن طریق روش معکوس ۰/۰۵۵ تخمین زده شده است
- ۳- پراکندگی در همبستگی بین شدت بارش موثر و دبی اوج وقایع کم‌شدت و متوسط (شکل ۸). چون در این رابطه سایر پارامترهای بکار رفته برای همه وقایع ثابت هستند بنابراین پارامتر شدت بارش موثر تعیین کننده مقدار زمان پیمایش (شکل ۸) و در نتیجه نتایج آماری خواهد بود. با توجه به اینکه در وقایع ۷، ۸، ۱۰، ۴ و ۲ که نتایج آماری آنها مناسب است نیز از همان مقادیری برای عرض آبراهه اصلی در محل خروجی حوضه و ضریب زبری استفاده شده است که برای سایر وقایع مورد استفاده قرار گرفته است، بنابراین نتایج ضعیف نیمی از وقایع به عامل سوم نسبت داده می‌شود. به عبارت دیگر با توجه به ضریب تبیین حدود ۰/۶۶ (شکل ۸ نمودار پایین) حدود ۳۴٪ از دبی اوج وقایع کم‌شدت و متوسط به وسیله عواملی به غیر از شدت بارش موثر توجیه می‌شود.
- ژئومورفولوژی آبراهه اصلی یکی از پارامترهایی است که بر زمان پاسخ حوضه و در نتیجه توزیع زمانی و مکانی رواناب موثر است (گریکه و اسمیتز، ۲۰۱۴، ۱۹۳۵ و ۱۹۳۶). نتایج نشان می‌دهد یکی از پارامترهای مهم و موثر در پیش‌بینی هیدروگراف حوضه مورد مطالعه، زمان پیمایش آبراهه اصلی است که معکوس سرعت جریان است و از بارشی به بارش دیگر متفاوت است. روابط مختلف زمان‌های پیمایش متفاوتی ارائه کرده‌اند که هر یک با وقایع بارش-رواناب ویژه‌ای قرابت دارند. از آنجا که سرعت جریان در رابطه مانینگ به سه پارامتر شیب (S)، ضریب زبری (n) و شعاع هیدرولیکی (R) وابسته است، با توجه به ثبات نسبی شیب و ضریب زبری، آنچه که زمان پیمایش وقایع مختلف را متفاوت می‌کند شعاع هیدرولیکی است. روابط c (گروه یک) و d (با گام‌های ۰/۶ الی ۰/۸) (گروه ۲) که زمان پیمایش طولانی‌تری دارند وقایعی با بارش موثر، شعاع هیدرولیکی و سرعت جریان کمتر و در نتیجه دبی اوج پایین‌تر را در صدر بهترین تخمین‌های خود قرار داده‌اند. در صدر بهترین تخمین‌های روابط a (گروه یک) و d (گروه دو) (گام‌های ۰/۲ تا ۰/۴) که از زمان پیمایش کمتری برخوردارند وقایعی با شدت موثر، شعاع هیدرولیکی و سرعت جریان بیشتر و در نتیجه دبی اوج بالاتر قرار دارند. در صدر بهترین نتایج حاصل از کاربرد رابطه e (گروه ۳) وقایعی با دبی‌های اوج مختلف دیده می‌شود زیرا این رابطه از پارامتر شدت بارش موثر (\dot{I}_e) بهره می‌برد که با زمان پیمایش رابطه معکوس و با دبی اوج رابطه مستقیم دارد و سایر روابط منتخب در این نوشتار فاقد آنند.
- در مجموع تعدادی از روابط زمان پیمایش با شرایط متوسط هیدروکلیماتولوژی حوضه انطباق بیشتری دارند و ویژگی‌های معمول حاکم بر حوضه را منعکس می‌کنند. به عبارتی دیگر این روابط وقایع معمول و پرتکرار حوضه را بهتر تخمین می‌زنند. این روابط شامل برنسبای-ویلیامز و گوپتا و همکاران (گام‌های ۰/۶ تا ۰/۸) است. تعداد دیگری از روابط وقایعی را بهتر تخمین می‌زنند که متفاوت از شرایط معمولی حوضه هستند. این وقایع شدیدتر و کم تکرار هستند و از دبی اوج بالاتری برخوردارند. رابطه کریچ، جانستون-کراس و گوپتا و همکاران (گام‌های ۰/۲ الی ۰/۴) از این دست هستند. همچنین نوع پارامتر به کار رفته در روابط بر نتایج حاصل تاثیرگذار بوده است. پارامتر وسعت حوضه زهکشی (A) در رابطه برنسبای-ویلیامز متوسط نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری را برای ۱۰ واقعه نسبت به روابط کریچ و جانستون-کراس ارتقا داده است. این سه رابطه در پارامترهای طول آبراهه (L_s)، شیب آبراهه (S_s) مشترکند. این نتایج با نتایج تقوایی سلیمی و همکاران (۲۰۱۷) سازگار است. آنها با استفاده از نرم افزار HEC-HMS روابط زمان تمرکز گوناگونی را در حوضه سفارود واقع در غرب استان گیلان برای چهار واقعه بارش-رواناب آزموده‌اند که رابطه برنسبای-ویلیامز بهترین نتیجه را در تخمین دبی اوج ارائه داده است و آنها پارامتر وسعت زهکشی را در تخمین زمان تمرکز عنصری کلیدی می‌دانند (تقوایی سلیمی و همکاران، ۲۰۱۷، ۱۳۱). پارامتر شدت بارش موثر (\dot{I}_e) در رابطه لی و همکاران همانطور که پیش

از این شرح داده شد باعث شده است تا هم وقایع معمول و کم شدت و هم وقایع شدید و کم تکرار در زمره بهترین نتایج آن قرار گیرد. با تغییر در ضریب گاما در رابطه گوبتا و همکاران، زمان تا اوج هیدروگراف‌ها تغییر می‌کند. مثلاً با تغییر گاما از $0/2$ به $0/8$ میانگین پارامتر Et_p برای ۱۰ واقعه از $0/8$ به $0/2$ رسیده است. با بهبود معیار فوق سایر معیارهای آماری نیز بهتر شده‌اند. همچنین افزایش گاما باعث کاهش دبی اوج هیدروگراف‌های تخمینی شده است. با توجه به موارد فوق پیشنهاد می‌شود در حوضه‌های دارای آمار ساعتی بارش-رواناب چنانچه از مدل PGIUH استفاده می‌شود جهت پیش‌بینی هیدروگراف تحلیل‌های آماری زیر انجام شود: ۱- رابطه یا روابط مناسب زمان پیمایش که با میانگین شرایط هیدروکلیماتولوژیکی حوضه سازگار هستند انتخاب و در پیش‌بینی وقایع معمولی از آنها استفاده شود ۲- رابطه یا روابط مناسب زمان پیمایش که با شرایط هیدروکلیماتولوژیکی متفاوت از میانگین سازگارند انتخاب و در وقایع حدی بارش-رواناب از آنها استفاده شود ۳- چنانچه برای پیش‌بینی بهتر، ضرایب تجربی یا توان‌های روابط فوق نیازمند واسنجی باشند این کار انجام گیرد مانند ضریب تجربی γ در رابطه گوبتا و همکاران. در حوضه‌هایی که فقط آمار بارش وجود دارد می‌توان از رابطه ۲۱ جهت محاسبه گاما استفاده و آنرا در رابطه گوبتا و همکاران استفاده کرد (حسینی و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۳):

$$\gamma = \frac{0.007\Omega(n_o\bar{L}_o)^{0.8}}{P_{24}^{0.5}\bar{S}_o^{0.4}} \times \frac{1}{\sum_{i=1}^{\Omega} \left[\frac{\pi_{oi}A_i}{2N_i\bar{L}_i} \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (21)$$

n_o = زبری سطح، \bar{L}_o = متوسط طول سطوح، P_{24} = عمق بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال، \bar{S}_o = متوسط شیب سطوح، π_{oi} = احتمال وضعیت اولیه، N_i = تعداد آبراهه رده i ، \bar{L}_i = متوسط طول آبراهه رده i ، A_i = مساحت حوضه، Ω = شماره رده آبراهه اصلی. با در نظر گرفتن مقدار $0/07$ برای متوسط زبری سطح و $29/5$ میلیمتر برای P_{24} که با استفاده از رابطه مقدار-مدت - فراوانی ارائه شده توسط کریمی صحنه‌سرای و آخوندعلی (۱۳۹۶) به دست آمده است، مقدار گامای حوضه امامه از طریق رابطه فوق $0/6$ به دست می‌آید که در طیف گاماهاى بهینه حوضه قرار دارد. سایر پارامترهای مورد نیاز از DEM قابل استخراج است. گامای تخمینی منطبق بر شرایط متوسط هیدروکلیماتولوژیکی خواهد بود و وقایع متفاوت از این شرایط را ضعیف‌تر تخمین می‌زند. در حوضه‌های فاقد آمار نیازمند استفاده از روابطی هستیم که صرفاً از پارامترهای ژئومورفولوژیکی بهره می‌برند. اینکه کدامیک از روابط اینچینی تخمین‌های بهتری ارائه می‌دهد می‌تواند از حوضه‌ای به حوضه دیگر متفاوت باشد. در این نوشتار از بین روابط فوق رابطه برنسبای - ویلیامز نتیجه بهتری ارائه داده است اما اینکه آیا این رابطه و روابط مشابهی که از پارامتر وسعت حوضه زهکشی بهره‌مندند را می‌توان برای سایر حوضه‌ها توصیه کرد، نیازمند مطالعات بیشتر و سیستماتیک و استفاده از داده‌های آماری بیشتر است. حتی در حوضه‌های فاقد آمار یا دارای آمار ناقص چنانچه رابطه‌ای سازگار با شرایط متوسط حوضه تشخیص داده شد انتخاب سایر روابط جهت شبیه‌سازی وقایع حدی با توجه به مقدار زمان پیمایشی که تخمین می‌زنند آسان خواهد بود. همچنین در حوضه‌هایی که جریان روزمینی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر هیدروگراف می‌گذارد بایستی روابط مربوط را تحلیل و بهترین‌ها را انتخاب کرد. نهایتاً اینکه همه تحلیل‌ها و نتایج فوق مبتنی بر تعداد محدودی واقعه (۱۰ عدد) بوده است و چنانچه از داده‌های آماری بیشتری استفاده شود ممکن است در برخی نتایج تغییراتی حاصل شود مانند مقادیر معیارهای آماری (جدول ۴)، مقدار گامای بهینه (جدول ۴) و ضرایب تبیین نمودارهای همبستگی و رگرسیون، اما بعید است نتایج کلی دچار تغییر اساسی شود مثلاً اینکه رابطه کریپچ نتایج آماری بهتری از رابطه برنسبای - ویلیامز ارائه دهد، و یا اینکه گامای بهینه از $0/6$ به $0/3$ یا $0/4$ برسد، همچنانکه گامای بهینه محاسبه شده مستقل از تعداد داده‌های آماری و با استفاده از رابطه ۲۱ با گامای بهینه محاسبه شده از طریق آزمون و خطا و براساس تعداد ۱۰ واقعه بارش-رواناب (جدول ۴) با هم منطبق هستند (مقدار $0/6$).

نتیجه گیری

مدل PGIUH از ساختار ثابت و عناصر متغیر تشکیل شده است. الگوی شبکه‌بندی آبراه‌های ساختار ثابت و زمان‌های پیمایش عناصر متغیر مدل هستند. عناصر متغیر شامل زمان پیمایش سطوح و زمان پیمایش آبراه‌هاست. هدف از این مطالعه تحلیل روابط مختلف زمان پیمایش از طریق مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری هر یک از این روابط با داده‌های مشاهده‌ای در حوضه آبریز امامه بوده است. نتایج نشان می‌دهد که زمان پیمایش سطوح تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر تخمین هیدروگراف حوضه نداشته است ولی تاثیر زمان پیمایش آبراه‌ها تعیین کننده بوده است. عدم تاثیر زمان پیمایش سطوح ناشی از کوتاهی مسیر جریان آب و زمان پیمایش بر روی آن بوده است. این موضوع نشان می‌دهد میزان تراکم زهکشی و نسبت سطح به زهکش در هیدروگراف خروجی حوضه‌ها نقش مهمی دارد به طوری که هرچقدر این نسبت بالاتر و شبکه زهکشی کم‌تراکم‌تر باشد تاثیر زمان پیمایش سطوح در هیدروگراف خروجی بیشتر خواهد شد. از بین روابط زمان پیمایش آبراه‌های که در این مطالعه تست شده است روابط برنسیای- ویلیامز و گویتا و همکاران (گاما‌های ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸) که زمان پیمایش آبراه‌ها را طولانی‌تر تخمین زده‌اند وقایع پرتکرارتر و با دبی اوج کمتر را بهتر و روابط کریچ، جانستون-کراس و گویتا و همکاران (گاما‌های ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴) که زمان پیمایش آبراه‌ها را کمتر تخمین زده‌اند وقایعی با دبی اوج بیشتر را بهتر پیش‌بینی کرده‌اند. در رابطه لی و همکاران وقایعی از هر دو طیف دبی اوج وجود دارد که نسبتا خوب پیش‌بینی شده‌اند که دلیل آن وجود پارامتر شدت بارش موثر (\bar{t}_e) در فرمول است. چون زمان پیمایش آبراه به سرعت جریان آب وابسته است و سرعت جریان در رابطه مانینگ به سه پارامتر ضریب زبری (n)، شیب (S) و شعاع هیدرولیکی (R) بستگی دارد و با توجه به ثابت بودن پارامترهای ضریب زبری و شیب، آنچه که در نهایت تعیین کننده دقت پیش‌بینی هیدروگراف از طریق مدل PGIUH در حوضه امامه است شعاع هیدرولیکی است. شدت بارش موثر تعیین کننده شعاع هیدرولیکی است و در این مطالعه همبستگی خوبی با دبی اوج داشته است. در مجموع و به طور میانگین روابط d (گاما‌های ۰/۶ و ۰/۷) و c به ترتیب بهترین شبیه‌سازی‌ها را در بین فرمول‌های منتخب ارائه داده‌اند. روابط d و e در ادبیات مدل PGIUH زیاد مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی روابط a ، b و c که در این نوشتار مورد استفاده قرار گرفته‌اند در اصل جهت تخمین زمان تمرکز حوضه‌های کوچک کاربرد دارند. برتری رابطه c نسبت به روابط a و b در استفاده از پارامتر وسعت حوضه زهکشی (A) است و نتایج بهتر آن نسبت به دو رابطه فوق نشان‌دهنده اهمیت وسعت حوضه زهکشی در ایجاد رواناب است. همچنین این رابطه از پارامترهای ساده‌ای بهره می‌برد که به راحتی قابل دسترسی است. با توجه به اینکه اقلیم منطقه سرد و نیمه مرطوب است. نتایج این مطالعه می‌تواند در تحلیل و ارزیابی و انتخاب روابط زمان پیمایش جهت پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های دارای اقلیم نیمه مرطوب مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- ابراهیمی، ک.، محمدی‌وند، م.، عراقی‌نژاد، ش.، و مدرسی، ف.، ۱۳۹۷، مقایسه کارایی سه مدل هیدرولوژیکی *AWBM*، *Sacramento* و *IHACRES* در یک حوضه واحد (مطالعه موردی: حوضه معرف امامه)، اولین همایش ملی راهبردهای مدیریت منابع آب و چالش‌های زیست محیطی، ساری
- ایلدرمی، ع.، و غلامیان، ح.، ۱۳۹۹، برآورد دبی حداکثر سیلاب، ظرفیت انتقال و رسوب حوضه آبریز سنقر با استفاده از دو مدل *GIUH* و *Win TR-55*، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۲۴، صص ۱۸ - ۱
- بهرامی، ش.، یمانی، م.، و محمودی، ف.، ۱۳۸۶، ارزیابی مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (*GIUH*) در حوضه آبخیز کنگیر (ایوان غرب)، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۰، صص

- حسین زاده، س. ر.، ۱۳۹۷، مبانی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، چاپ اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد
- سلاجقه، ع.، سنجرى، م.، موحد، س. م.، و ملکيان، آ.، ۱۳۹۷، تحلیل چند مقایسه مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی (GIUH)، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۷۱، شماره ۴، صص ۹۷۱-۹۶۳
- شکوهی، ع.، و عزیزیان، ا.، ۱۳۹۲، ارزیابی اثر توان تفکیک مدل‌های رقومی ارتفاعی و آستانه شکل‌گیری آبراهه‌ها بر نتایج مدل بارش - رواناب ژئومورفولوژیکی مبتنی بر موج سینماتیک (KW - GIUH)، مجله هیدرولیک، دوره ۸، شماره ۳
- شکوهی، ع.، عزیزیان، ا.، جماعت، ر.، و سینگ، و. ج.، ۱۳۹۶، تحلیل حساسیت مدل مبتنی بر موج سینماتیک $KW - GIUH$ نسبت به روش‌های مختلف برآورد نفوذ و ضرایب زبری، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۹، شماره ۳، صص ۲۷۵ - ۲۶۲
- غلامی صومعه، ف.، ۱۳۸۹، مقایسه هیدروگراف‌های سیلاب مستخرج از مدل‌های مخزنی لویز و ژئومورفولوژی تحلیلی (مطالعه موردی: حوضه ليقوان)، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: احمد فاخری فرد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
- غیاثی، ن.، ۱۳۷۵، واسنجی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفوکلیماتولوژی در حوضه آبخیز امامه، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- فتاحی، ا.، فتاحی نافچی، ر.، صمدی بروجنی، ح.، و عبداللهی، خ.، ۱۳۹۲، ارزیابی هیدروگراف SCS و هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی (GIUH) در حوضه آبخیز جونقان، مجله پژوهش آب ایران، سال ۷، شماره ۱۳، صص ۲۰۸ - ۲۰۵
- کریمی صحنه آرابی، ف.، و آخوندعلی، ع.، ۱۳۹۶، بررسی تاثیر مشارکت زیرحوضه‌ها در تولید سیلاب (مطالعه موردی: حوضه آبریز امامه)، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، ۲۰ و ۲۱ تیرماه، دانشگاه شهرکرد
- گلکاریان، ع.، نقیعی، س. ا.، و داودی مقدم، د.، ۱۳۹۳، ارزیابی کارایی روش ژئومورفولوژی در برآورد ابعاد هیدروگراف واحد لحظه‌ای و مقایسه آن با روش‌های اشنایدر، SCS و مثلثی (مطالعه موردی: حوضه آبریز جنگ کارده)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۸، شماره ۲، صص ۴۵۰-۴۴۰
- مشاری عشق آباد، س.، نوحه‌گر، ا.، و امیدوار، ا.، ۱۳۹۱، شبیه‌سازی رواناب به روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک (مطالعه موردی: حوضه بار- خراسان رضوی)، فصلنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۶، صص ۱۲۶-۱۱۵
- معتمد وزیری، ب.، پزشکی، م.، و احمدی، ح.، ۱۳۹۶، ارزیابی تغییر کاربری اراضی و تاثیر آن بر هیدروگراف سیل حوضه آبخیز امامه، مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدید شونده، سال ۸، شماره ۲
- وزارت نیرو، شرکت آب منطقه‌ای استان تهران
- وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران
- یمانی، م.، محمودی، ف.، عیوضی، ج.، و نصیری، ع.، ۱۳۸۳، برآورد سیل با استفاده از آنالیز GIUH، نشریه علوم جغرافیایی، جلد ۳، شماره ۳ و ۴
- یمانی، م.، و نصیری، علی.، ۱۳۸۸، تجزیه و تحلیل شبکه‌های عصبی مصنوعی ژئومورفولوژیکی در برآورد رواناب مستقیم (حوضه جاجرود، زیرحوضه امامه)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۸، صص ۳۳-۴۴
- Arekhi, S. and Rostamizad, Gh., 2011. Sediment yield estimating from three microwatersheds by integrated KW - GIUH and MUSLE models. *Advances in Environmental Biology*, 5

- (6), pp 1346 – 1358
- Chow, V. T., 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill
- Dabbaghian-Amiry, M. and Mohammadi, A. A., 2012. Regional model for peak discharge estimation in ungauged drainage basin using GIUH, Snyder, SCS and Triangular models. *International Journal of Water Resources & Environmental Engineering*, Vol a (4), pp 86 - 96
- Eppert, S., 2005. Development and application of an event – based model using the GIUH approach for the simulation of discharge and solutes. *Institut fur Hydrologie, Referent: Stefan Uhlenbrook, Albert – Ludwigs – Universitat Freiburg I. BR*
- Franchini, M. and Ö Connell, P. e., 1996. An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Journal of Hydrology*, 175, pp 407 - 428
- Gericke, O. J. and Smithers, J. C., 2014. Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (11)
- Govindaraju, R. S. and Zhang, B., 2003. Geomorphology – based artificial neural networks (GANNs) for estimation of direct runoff over watersheds. *Journal of Hydrology*, 273, pp 18 - 34
- Gupta, V. K., Waymire, E. and Wang, C. T., 1980. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resources Research*, 16, pp 855 – 862
- Hosseini, S. M., Mahjouri, N. and Riahi, S., 2015. Development of a direct geomorphologic IUH model for daily runoff estimation in ungauged watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*
- Huang, e., Cao, Sh., Lee, K. T., Ho, J., Liu, X. and Yang, K., 2010. Analysis of runoff in ungauged mountain watersheds in Sichuan, China using kinematic-wave-based GIUH model. *Journal of Mountain Science*, 7, pp 157-166
- Jain, S. K., Singh, R. D. and Seth, S. M., 2000. Design flood estimation using GIS supported GIUH approach. *Water Resources Management*, Kluwer Academic Publishers, 14, pp 369 – 376
- Khaleghi, M. R., Ghodusi, J. and Ahmadi, H., 2014. Regional analysis using the geomorphologic instantaneous unit hydrograph (GIUH) method. *Soil and Water Resources*, 9, pp 25 - 30
- Lee, K. T. and Yen, B. Ch., 1997. Geomorphology and kinematic – wave based hydrograph derivation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123, 1 (73)
- Masoud, M., Niyazi, B., Khan, A. A. and Basahi, j., 2020. Variability of the geomorphometric characteristics of Makkah Al-Mukaramah basins in Saudi Arabia and the impact on the hydrologic response. *Journal of African Earth Sciences*, 168, 103842
- Lee, K. T. and Chang, Ch. H., 2005. Incorporating subsurface flow mechanism into geomorphology based IUH modeling. *Journal of Hydrology*, 311, pp 91 – 105
- Lee, K. T. and Chang, Ch. H., 2017. Analysis of flow-sediment rating curve hysteresis based on flow and sediment travel time estimations. *International Journal of Sediment Research*, pp 171-182
- Mohammadi, A. A., Ahmadi, H., Khaleghi, Sh., Salajegheh, A. and Soltani, S., 2013. Estimation of instantaneous peak discharge using GIUH, Snyder, SCS & Triangular models: A case study of Central Alborz Watershed. *Desert*, 18, pp 105 - 111
- Najafi, M. R., Behbahani, S. M. R., Abdollahi, J. and Hosseini, S. M., 2009. A comparative study of Geomorphological Artificial Intelligent model and GIUH for direct runoff computations. *Iran Water Resources Research*, 5 (2), pp 1 - 9
- Najafi, M. R., Lee, K. T., and Hosseini, S. M., 2007. Ann modeling for estimation of surface and subsurface flows based on watershed geomorphology. *Agricultural Sciences and Technology*, 9, pp 305 – 316
- NRCS National Engineering Handbook., 2010. Chapter 15
- Pereira, M. L. F., Campo, G. F. N., Kobiyama, M. and Castro, N. M. R., 2016. Regionalization with hydraulic geometry and fractal: case study with geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*, 21 (2), pp 347-359
- Ouyang, W., Hao, F., Mingze, S., Xiaojun, G. and Huang, W., 2015. Coupling the Xinanjiang model with geomorphologic instantaneous unit hydrograph for flood forecasting in northeast China. *International Soil and Water Conservation Research*, 3, pp 66 - 76
- Raghunath, H. M., 2006. *Hydrology : principles, analysis, design*. New Age International (P) Ltd
- Raghuwanshi, N. S., Bhadra, A., Panigrahy, N., Singh, R., Mal, B. C. and Tripathi, M. P., 2008. Development of a geomorphological instantaneous unit hydrograph model for scantily gauged watersheds. *Environmental Modeling and Software*, 23, pp 1013 – 1025

- Rodriguez – Iturbe, I. and Valdez, J., 1979. *The geomorphologic structure of hydrologic response*. *Water Resources Research*, 15 (6)
- Taghvaye Salimi, E., Nohegar, A., Malekian, A., Hoseini, M. and Holisaz, A., 2017. *Estimating time of concentration in large watersheds*. *Paddy Water Environment*, 15, pp 123 – 132
- Singh, B. R., Singh, S., Singh, P. and Mishra, D. K., 2014. *A study on geomorphological response for runoff prediction in small watershed*. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR – JCE)*, 16, Issue 4, Ver. VI, pp 86 - 94
- Van der Tak, L. D. and Bras, R. L., 1990. *Incorporating hillslope effects into the geomorphologic instantaneous unit hydrograph*. *Water Resources Research*, 26 (10), pp 2393 - 2400
- Yao, Ch., Zhang, K., Zhongbo, Y., Zhijia, L. and Qiaoling, L., 2014. *Improving the flood prediction capability of the Xinanjiang model in ungauged nested catchments by coupling it with the geomorphologic instantaneous unit hydrograph*. *Journal of Hydrology*, pp 517, 1035 – 1048.

