

بهنگام‌سازی زمان واقعی در مدل پیش‌بینی سیل با بکارگیری روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE)¹

بخش دوم: کاربرد

علی حیدری^{1*}، بهرام ثقفیان²، رضا مکنون³

1- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، همکار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

2- مدیر پروژه، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران

3- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

* تهران، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

saghafian@scwmri.ac.ir

چکیده- در این بخش از مقاله، روش عمومی تخمین عدم قطعیت تشابهات به عنوان روش جدید بهنگام‌سازی پارامترهای مدل بارش-رواناب در زمان واقعی در زیرحوزه قره‌سو-کرخه، مورد آزمون قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا در دو گزینه مختلف، دبی‌های مشاهده‌ای دوره‌های پیوسته از زمان شروع سیل و دوره‌های مجزا در طول هیدروگراف سیل، مبنای اصلاح پارامترها و بهنگام‌سازی پیش‌بینی قرار گرفتند که روش پیوسته نتایج بهتری را در پی داشت. بنابراین با تعمیم روش پیوسته به بهنگام‌سازی زمان واقعی در هر گام زمانی، زمان پیش‌هشدار و خطاهای پیش‌بینی تعیین شد. در این رابطه فرض گردید که بارش در گامهای زمانی آتی قطع می‌شود و در هر گام زمانی، شدت بارش در حال وقوع و دبی مشاهده‌ای برای بهنگام‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این بهنگام‌سازی حاکی از کارایی و انعطاف‌پذیری روش GLUE در جبران خطاهای ناشی از عدم پیش‌بینی بارش است. زمان پیش‌هشدار به عنوان فاصله زمانی بین زمان پایدار شدن توزیع دبی اوج و زمان واقعی وقوع دبی اوج در نظر گرفته شد. در دو سیلاب مورد آزمون در حوزه آبریز قره‌سو با زمان تمرکز 20 ساعت، زمان پیش‌هشدار حدود 8 ساعت بدست آمد. خطای پیش‌بینی پس از پایدار شدن توزیع احتمالاتی دبی اوج در زمان واقعی ثابت می‌ماند. این خطا در دو سیلاب مورد نظر به ترتیب 21%- و 16%+ محاسبه شد که منشاء آن عدم قطعیت ساختار مدل و داده‌های ورودی است.

کلید واژگان: GLUE، مونت کارلو، تئوری بیز، عدم قطعیت، پیش‌بینی سیل، بهنگام‌سازی زمان واقعی، حوزه قره‌سو.

1- مقدمه

خطای مدلسازی، بر اثر عدم انطباق کامل معادلات ریاضی با فیزیک پدیده‌های طبیعی ایجاد می‌شود و برآورد پارامترهای مدل، بسته به دقت آمار و اطلاعات موجود، همواره با خطا همراه است.

عدم قطعیت در پیش‌بینی سیل، ناشی از عوامل مختلفی شامل خطای داده‌های ورودی، خطای مدلسازی و خطای برآورد پارامترها است. عدم قطعیت داده‌های ورودی، از وجود خطا در داده‌های شبکه تله‌متری یا خطا در پیش‌بینی داده‌های ورودی نظیر بارش ناشی می‌شود.

1. Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

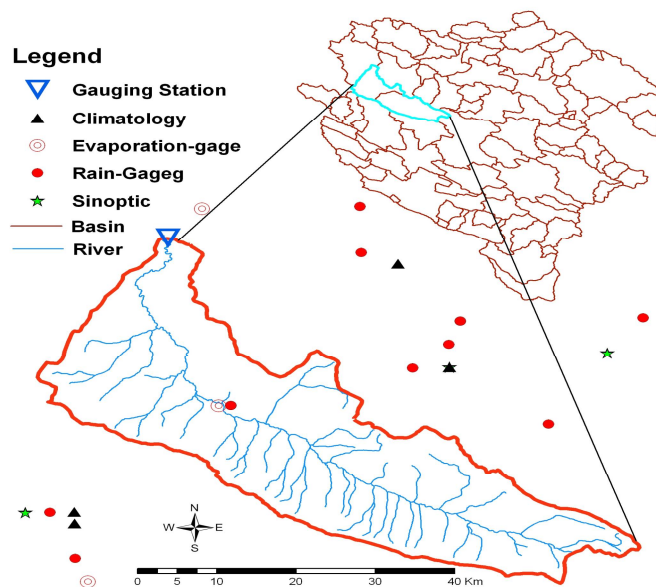
در فصول سیلابی بارش توأم باران و برف همراه با ذوب شدن برف منابع ایجاد سیلاب را فراهم می‌آورند. لذا برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در این حوزه، شبیه‌سازی بارش و ذوب برف برای تعیین سهم برف‌گیر در زمان بارش و ذوب برف حاصل از ذخیره برفی حوزه، اجتناب ناپذیر است که بدین منظور از مدل توزیعی-مفهومی مادکلارک استفاده شد. در این مدل، روش نفوذ نمایی همراه با روش درجه-روز به ترتیب برای شبیه‌سازی نفوذ و ذوب برف بکار رفته است. پارامترهای این مدل شامل شش پارامتر نفوذ نمایی با چهار پارامتر مربوط به نفوذ باران (SR, DL, RL, ER) و دو پارامتر نفوذ ذوب برف (SS, RK) است که شرح آنها در بخش اول مقاله آورده شده است. دو پارامتر رواناب سطحی، زمان تمرکز و ضریب ذخیره مخزن خطی (R, Tc) است. حیدری و همکاران (1383) واسنجی و بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل بارش-رواناب در سیلابهای ثبت شده را انجام دادند که نتایج آن برای تعیین محدوده تغییرات پارامترها به منظور بهنگام‌سازی زمان واقعی در این مقاله استفاده می‌شود.

برای منظور کردن اثر منابع مختلف ایجاد خطا در پیش‌بینی، می‌توان هر سه نوع عدم قطعیت را در نظر گرفت.

در این مقاله عدم قطعیت ناشی از خطای برآورد پارامترهای مدل بارش-رواناب در پیش‌بینی زمان واقعی در نظر گرفته می‌شود. بدین منظور از روش GLUE استفاده می‌شود که سوابق و متدولوژی آن در بخش اول مقاله ارائه شده است. در مقاله حاضر، کاربرد روش فوق در بهنگام‌سازی زمان واقعی پیش‌بینی سیل بررسی می‌شود.

2- منطقه تحقیق و مدل بارش-رواناب

منطقه مورد مطالعه، حوزه قره‌سو واقع در بخش شمال غربی حوزه آبریز کرخه است که موقعیت آن در شکل 1 نشان داده شده است. مساحت این حوزه در ایستگاه‌های هیدرومتری خرس‌آباد و قره باغستان به ترتیب 1700 و 5000 کیلومتر مربع است که بخش عمده سیلاب رودخانه سیمره از این حوزه ناشی می‌شود. رژیم رواناب حوزه، از روند حوزه‌های کوهستانی تبعیت می‌کند؛ به طوری که



شکل 1 موقعیت حوزه قره‌سو در حوزه آبریز کرخه به همراه ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری

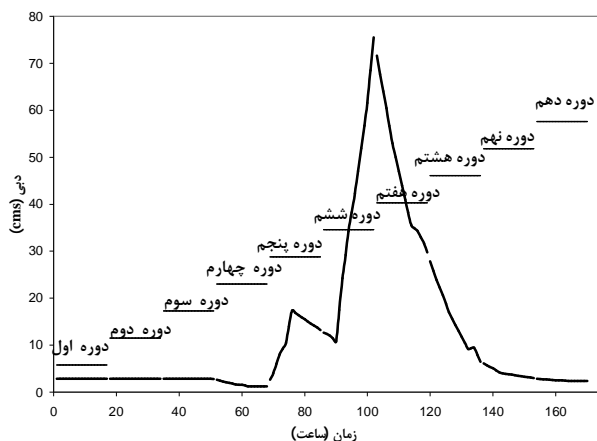
3- نتایج بهنگام‌سازی پارامترها در زمان واقعی

در بهنگام‌سازی زمان واقعی، از دبی مشاهده‌ای برای اصلاح پارامترهای مدل بارش-رواناب و پیش‌بینی سیل متناظر با آن استفاده می‌شود. بدین صورت که تشابهات مشروط بر اساس دبی مشاهده‌ای محاسبه شده و این تشابهات برای تعیین تشابهات پیشین و پسین استفاده می‌شود. تشابهات پیشین و پسین نیز به عنوان وزنه‌های دبی‌های حاصل از گروه پارامترهای (مدلهای) مختلف در هر گام زمانی، برای تعیین توزیع احتمالاتی دبی در آن گام زمانی بکار می‌رود. این مراحل با افزوده شدن دبی مشاهده‌ای زمان واقعی تکرار می‌شود. نحوه محاسبه تشابهات مشروط بر اساس دبی مشاهده‌ای زمان واقعی می‌تواند متفاوت باشد که در این مقاله دو حالت روش مجزا و پیوسته مورد آزمون قرار گرفت (برای توضیح بیشتر به بخش اول مقاله رجوع کنید). در روش مجزا، دوره‌های زمانی به صورت ناپیوسته در طول زمان هیدروگراف سیل در نظر گرفته می‌شوند، اما در روش پیوسته، این دوره‌ها از ابتدای هیدروگراف تا گام زمانی بهنگام‌سازی زمان واقعی مد نظر قرار می‌گیرد.

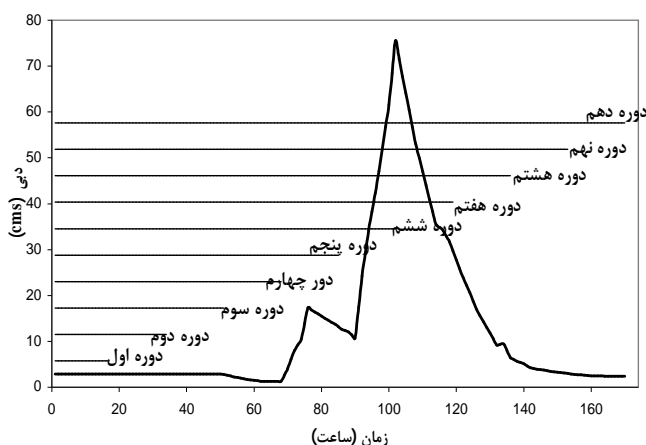
4- آزمون روشهای مجزا و پیوسته

بکارگیری روش GLUE در دوره‌های مختلف وقوع سیل در زمان واقعی، به روش مجزا و پیوسته، برای دو سیلاب مورخ آذر 57 و آبان 68 آزمایش شد. در شکل 2 نمونه‌ای از نحوه مجزاسازی هیدروگراف سیل آذر 57 به روش مجزا و پیوسته برای 10 دوره نشان داده شده است. در این دو آزمون، سری زمانی بارش مشاهده‌ای بکار رفت. در روش مجزا، معیار تشابه $L(\theta_i|Y)$ که در بخش اول مقاله تشریح شد، مربوط به هر دوره مجزا برای تعیین تشابه پیشین و پسین بکار رفت و در روش پیوسته، تشابه دوره‌ها از زمان شروع سیل تا انتهای دوره مربوط، برای اصلاح پیش‌بینی‌ها استفاده شد. همچنین تشابه پسین در هر دوره بهنگام‌سازی، به عنوان تشابه پیشین دوره بعدی در نظر گرفته شد. که در روش مجزا نتایج مطلوبی حاصل نشد، اما در روش پیوسته، پس از شکل‌گیری هیدروگراف سیلاب، نتایج مطلوبی حاصل شد.

از آنجا که برای تعیین تابع تشابه هر مدل، واریانس خطاهای حاصل از تمامی مدلها مشارکت دارند، بنابراین باید حداقل چند دبی هیدروگراف برای تعیین واریانس خطاها و تابع تشابه متناظر با آن در روش مجزا در دست باشد.



ب- دوره های مجزا



الف- دوره های پیوسته

شکل 2 زیر دوره‌های 10 گانه هیدروگراف سیل مورخ 57/9/18 (الف - پیوسته، ب - مجزا)

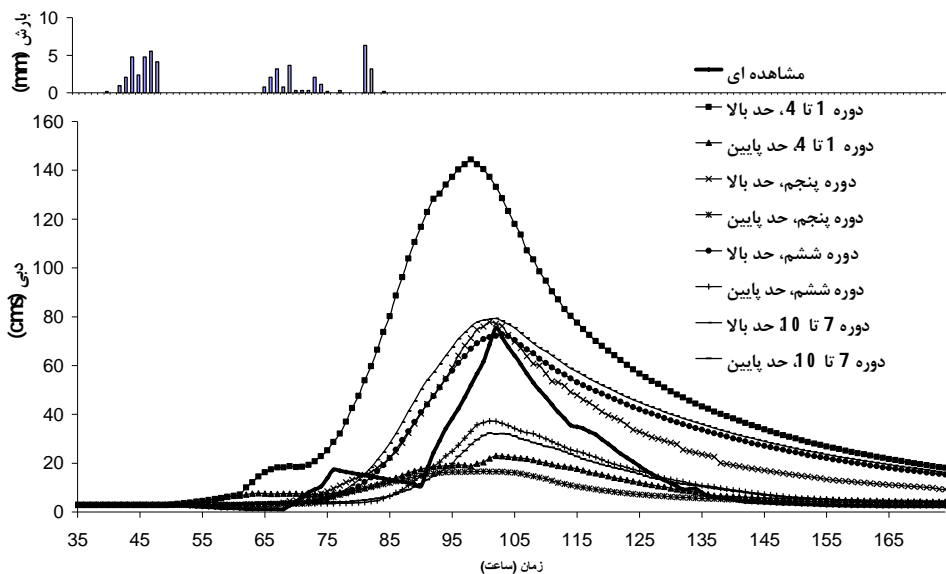
اصلاح محدوده اطمینان پیش‌بینی با 1500 گروه مدل تولید شده در دو روش فوق بر اساس توزیع پسین برای تعداد دوره‌های زمانی 10 گانه انجام شد که نتایج آن برای روش پیوسته در شکل 3 ارائه شده است. محدوده پایین و بالا به ترتیب مربوط به سطوح اطمینان 10% و 90% است. سطوح اطمینان، مربوط به دبی متناظر با احتمالات مختلف در توزیع تجمعی (CDF) دبی‌های هیدروگراف در هر گام زمانی است.

توزیع تجمعی دبی‌های هیدروگراف نیز با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مدل‌های مورد قبول و وزنهای حاصل از تشابهات پیشین و پسین در هر گام زمانی شکل می‌گیرد. همان‌طور که در شکل 3 مشخص است، محدوده پیش‌بینی‌ها در روش پیوسته با نزدیک شدن زمان واقعی به دبی اوج هیدروگراف سیل محدودتر شده و پس از گذر از دبی اوج، این محدوده ثابت باقی می‌ماند. در روش مجزا، این محدوده در مراحل بهنگام‌سازی مختلف محدود نمی‌شود که دلیل آن، عدم انطباق هیدروگراف محاسبه‌ای با مشاهده‌ای در دوره‌های مجزا و عدم اصلاح دبی اوج بر اساس خطاهای مشاهده‌ای در این دوره‌ها است.

با تغییر تعداد دوره‌های هر سیل، تعداد دبی‌های هیدروگراف برای تعیین تشابه مربوط تغییر می‌کند، به بیان دیگر با تغییر تعداد دبی‌های هر دوره، تعداد دوره‌های بهنگام‌سازی نیز تغییر خواهد کرد.

در حالت مجزا به علت ضرورت وجود تعداد دبی‌های کافی برای محاسبه واریانس خطاها، امکان بهنگام‌سازی در هر گام زمانی ثبت داده‌ها وجود ندارد، اما در روش پیوسته این محدودیت فقط مربوط به شروع سیل است و با افزایش تعداد گام‌های زمانی برطرف می‌شود. تنها محدودیت روش پیوسته، زمان اجرای مدل مونت کارلو است. چنانچه زمان اجرای مدل بیش از گام زمانی ثبت داده‌ها باشد، تعداد مراحل بهنگام‌سازی در طول سیل محدود می‌شود.

در این مقاله آستانه رد شدن مدل در تابع تشابه وزنی 0/3 در نظر گرفته شد. علت انتخاب مقدار پایین برای آستانه رد شدن مدل، ساختن مدل‌هایی قابل قبول برای پیش‌بینی سیل در زمان واقعی و ایجاد اطمینان از پوشش دبی‌های مشاهده‌ای بود. در مراجع مختلف نیز همواره تأکید بر انتخاب مقداری از آستانه برای انتخاب مدل‌های قابل قبول است که دبی‌های مشاهده‌ای در محدوده 90% اطمینان قرار گیرند (Beven, 2002; Beven, Freer, 1996).



شکل 3 اصلاح هیدروگراف سیلاب مورخ 57/9/18 با 10 زیر دوره پیوسته (معیار تشابه وزنی با $N=1$ تعداد گروهی تصادفی 1500. معیار رد شدن مدل $> 0/3$)

الف - تفسیر نتایج روش پیوسته

در فرایند بهنگام‌سازی با روش پیوسته، دوره‌های اول و دوم در محدوده دبی پایه هیدروگراف سیل واقع شد، بنابراین کلیه سیلابهای حاصل از مدل‌های مختلف در تعیین محدوده پیش‌بینی‌ها استفاده شد. در این حالت تفاوتی بین محدوده پیش‌بینی حاصل از تشابه پیشین و محدوده بدون بهنگام‌سازی وجود ندارد. ضمن اینکه به علت عدم وجود تشابه مشروط داده‌های مشاهده‌ای، تشابه پسین وجود ندارد. در واقع به علت عدم شکل‌گیری خطاها در این دوره‌ها، تمامی مدل‌ها به عنوان مدل‌هایی مورد قبول¹ در نظر گرفته شد و محدوده پیش‌بینی‌ها با سطوح اطمینان مختلف با قبول تمامی مدل‌ها به عنوان مدل‌های مورد قبول تعیین شد که در آن محدوده پیش‌بینی‌ها وسیع است.

در دوره‌های زمانی سوم و چهارم به علت عدم انطباق هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در این بخش از هیدروگراف، تشابه پیشین و پسین وجود نداشت. بنابراین بهنگام‌سازی در این بخش هیدروگراف امکان‌پذیر نیست. لذا محدوده پیش‌بینی بدون بهنگام‌سازی قابل تعیین است که این محدوده نسبتاً وسیع می‌باشد. در دوره زمانی پنجم قبل از وقوع دبی اوج سیل نقش اصلاحی تشابه پیشین و پسین قابل توجه است؛ به طوری که محدوده پیش‌بینی‌ها در بخش‌های هیدروگراف کاهش چشم‌گیری دارد. در این دوره، سری زمانی خطاها از شروع سیل تا انتهای دوره زمانی پنجم، برای اصلاح پیش‌بینی بکار رفت و محدوده سطوح اطمینان کاهش نسبی 10% و 90% یافت. در دوره زمانی ششم که انتهای آن بسیار نزدیک به زمان وقوع دبی اوج سیل است، بهنگام‌سازی کاملاً مطلوب است، به طوری که محدوده‌ها همسو با هیدروگراف مشاهده‌ای کاهش یافته است. لازم است ذکر شود که برای اخذ نتایج مطلوب در روش GLUE، به تولید تعداد زیادی مدل نیاز است تا محدوده پارامترها

کاملاً پوشش داده شوند. در این مقاله، با توجه به محدودیت حافظه کامپیوتر تعداد مدل‌های تصادفی (سری پارامترها) 1500 در نظر گرفته شد. در تحقیقات مشابه در زمینه عدم قطعیت، تولید مدل تا 80000 توصیه می‌شود (Beven; 2000, 2002). در اجراهای مجدد مدل بدون هیچ گونه تغییر در داده‌های ورودی و محدوده پارامترها، مشاهده شد که محدوده‌های پیش‌بینی اندکی تغییر می‌کنند که این موضوع نشان از عدم پوشش کامل محدوده پارامترها با استفاده از 1500 مدل دارد. در دوره زمانی هفتم که انتهای آن از زمان وقوع دبی اوج هیدروگراف فراتر می‌رود، اثر بهنگام‌سازی بر روی دبی اوج بیشتر می‌شود زیرا خطای دبی اوج در این بهنگام‌سازی منظور شده است. از دوره زمانی هفتم تا دهم بهبود قابل توجهی در محدوده‌های پیش‌بینی دبی اوج اتفاق نمی‌افتد و حتی خطای پیش‌بینی دبی اوج به صورت جزئی افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان اثر تابع تشابه وزنی و عدم تأثیر مثبت خطاهای شاخه فروکش در اصلاح دبی اوج دانست. اثر خطاهای بخش اوج هیدروگراف در تابع وزنی بیشتر و در مقابل، اثر خطاهای شاخه افزایشی و فروکش هیدروگراف کمتر است.

ب - تفسیر نتایج روش مجزا و انتخاب روش

در آزمودن روش مجزا، در دوره‌هایی که در محدوده اوج هیدروگراف واقع بودند، نتایج مطلوبی حاصل می‌شود؛ به طوری که محدوده پیش‌بینی در آنها باریکتر از سایر دوره‌ها و منطبق بر دبی مشاهده‌ای است. علت این است که در دوره‌های مربوط به بخش اوج هیدروگراف در روش مجزا (دوره‌های 6 و 7) فقط خطاهای بخش اوج هیدروگراف در بهنگام‌سازی تأثیر دارند، در حالی که در روش پیوسته، سری زمانی خطاها از ابتدای هیدروگراف استفاده می‌شود. بنابراین همان‌طور که انتظار داریم، بهنگام‌سازی در دوره‌های مجزای واقع در بخش اوج هیدروگراف مطلوبتر است، به طوری که همزمان با کاهش

1. Behavioral

نسبی محدوده پیش‌بینی‌ها، انطباق با دبی اوج مشاهده‌ای نیز حاصل شده است. از آنجا که در زمان واقعی وقوع سیل، تشخیص بخش اوج هیدروگراف ممکن نیست، بنابراین بکارگیری روش پیوسته منطقی‌تر و واقع‌بینانه است. بنابراین در تعمیم بهنگام‌سازی به شرایط زمان واقعی، این روش مبنای بهنگام‌سازی در هر گام زمانی قرار گرفت.

5- توزیع احتمالاتی و خطای پیش‌بینی دبی اوج

به منظور مقایسه بهتر پیش‌بینی دبی اوج هیدروگراف، توزیع احتمالاتی آن در دوره‌های مختلف بهنگام‌سازی به روش پیوسته - به تفکیک برای دوره‌های مختلف - بر اساس تابع پیشین و پسین در شکل 4 نشان داده شده است. در دوره زمانی اول پیش‌بینی، به علت محدوده وسیع پارامترها و توزیع یکنواخت احتمالاتی آنها، محدوده پیش‌بینی دبی اوج وسیع و توزیع احتمالاتی آن پهن می‌شود. با بهنگام‌سازی پیش‌بینی بر اساس اطلاعات زمان واقعی، توزیع پارامترها اصلاح شده و حول مقادیر واقعی متمرکز می‌شود. در نتیجه توزیع احتمالاتی دبی اوج نیز حول مقدار واقعی (ثابت شده) متمرکز شده و به حالت پایداری می‌رسد. در مقایسه توزیع احتمالاتی دبی اوج در تشابه پسین نسبت به تشابه پیشین، از احتمالات دبی‌های خیلی بالا و خیلی پایین نسبت به دبی مشاهده‌ای کاسته می‌شود. اثر اصلاحی تشابه پسین نسبت به پیشین در دوره‌های زمانی ششم و هفتم هیدروگراف به مراتب بیشتر است. از طرف دیگر توزیع احتمالاتی دبی اوج هیدروگراف سیل در دوره‌هایی که به دبی اوج منتهی می‌شوند، بیشتر بر دبی مشاهده‌ای متمرکز می‌گردد. در جدول 1 مقادیر مورد انتظار¹ دبی اوج پیش‌بینی همراه با محدوده اطمینان مختلف در دوره‌های مختلف بهنگام‌سازی برای 10 دوره پیوسته ارائه شده است.

محدوده پیش‌بینی بدون بهنگام‌سازی (در دوره‌های زمانی اول تا چهارم) بسیار وسیع است، اما مقدار مورد انتظار دبی اوج بر اساس توزیع احتمالاتی آن، به دبی مشاهده‌ای نزدیکتر است. با بهنگام‌سازی، محدوده پیش‌بینی‌ها کاهش می‌یابد که این کاهش، سبب افزایش خطای پیش‌بینی مقدار مورد انتظار دبی اوج می‌شود. این خطا در طی دوره‌های مختلف بهنگام‌سازی کاهش می‌یابد و در دوره زمانی دهم به 16/4% می‌رسد.

6- توزیع احتمالاتی پارامترهای مدل

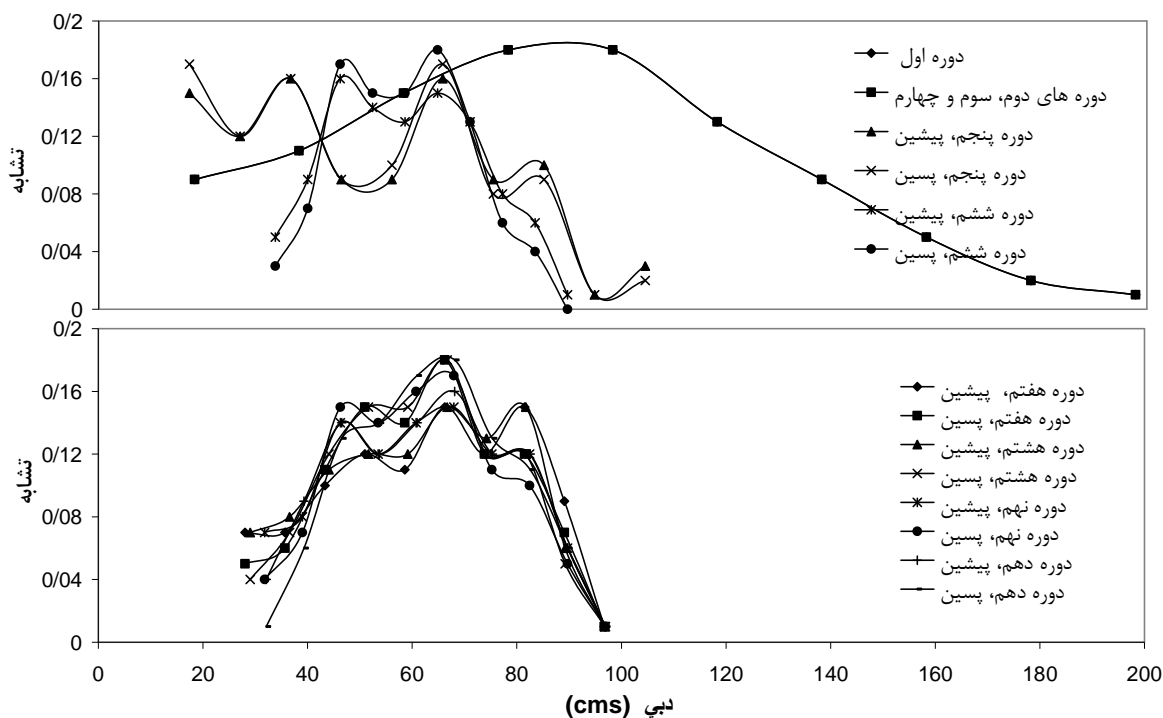
تقریباً در تمامی دوره‌های بهنگام‌سازی، نتایج حاصل از تشابه پسین بهتر از تشابه پیشین است. وجود خطا در پیش‌بینی به دلیل عدم قطعیت در داده‌های ورودی و ساختار مدل اجتناب‌ناپذیر است که با تغییر پارامترها، این خطا به حداقل ممکن کاهش می‌یابد.

در هر مرحله بهنگام‌سازی، توزیع احتمالاتی پارامترهای مدل بارش-رواناب نیز دستخوش تغییر می‌شوند. در واقع عدم قطعیت پارامترهای مدل بارش-رواناب در هر مرحله بر اساس داده‌های مشاهده‌ای کاهش می‌یابد. توزیع احتمالاتی پارامترهای حساس مدل در هر مرحله بهنگام‌سازی با ده دوره پیوسته در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده است.

پارامترهای غیر حساس، دستخوش تغییرات قابل توجهی نمی‌شوند، بنابراین از نمایش توزیع آنها خودداری می‌شود. این توزیعها نمایانگر نحوه تأثیر گذاری دبی مشاهده‌ای در هر دوره زمانی ثابت شده در پارامترهای مدل بارش-رواناب است.

در دوره‌های زمانی اول و دوم (دبی پایه هیدروگراف) به علت عدم وجود تشابه مشروط داده‌ها، توزیع پیشین و پسین برابر تشابه کلیه مدل‌های موجود است و در دوره‌های زمانی سوم و چهارم، به علت عدم وجود مدل قابل قبول در این محدوده از هیدروگراف، تشابه پیشین و پسین برابر تشابه کلیه مدل‌های موجود در نظر گرفته شد.

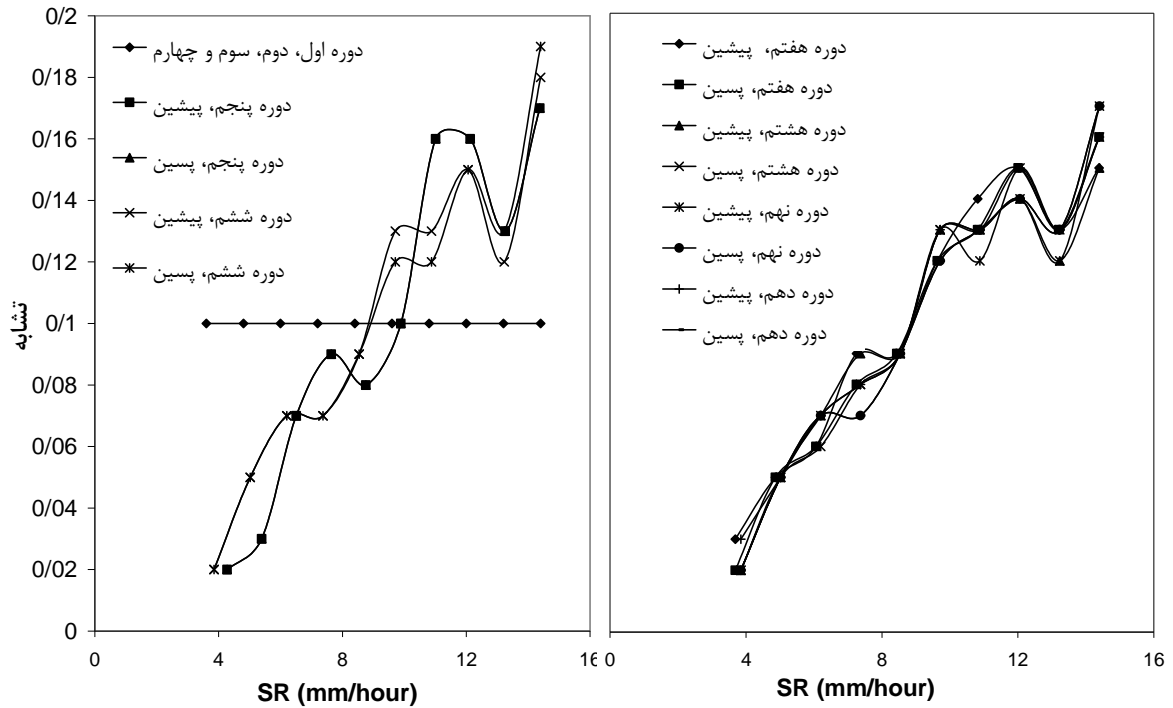
1. Expected Value



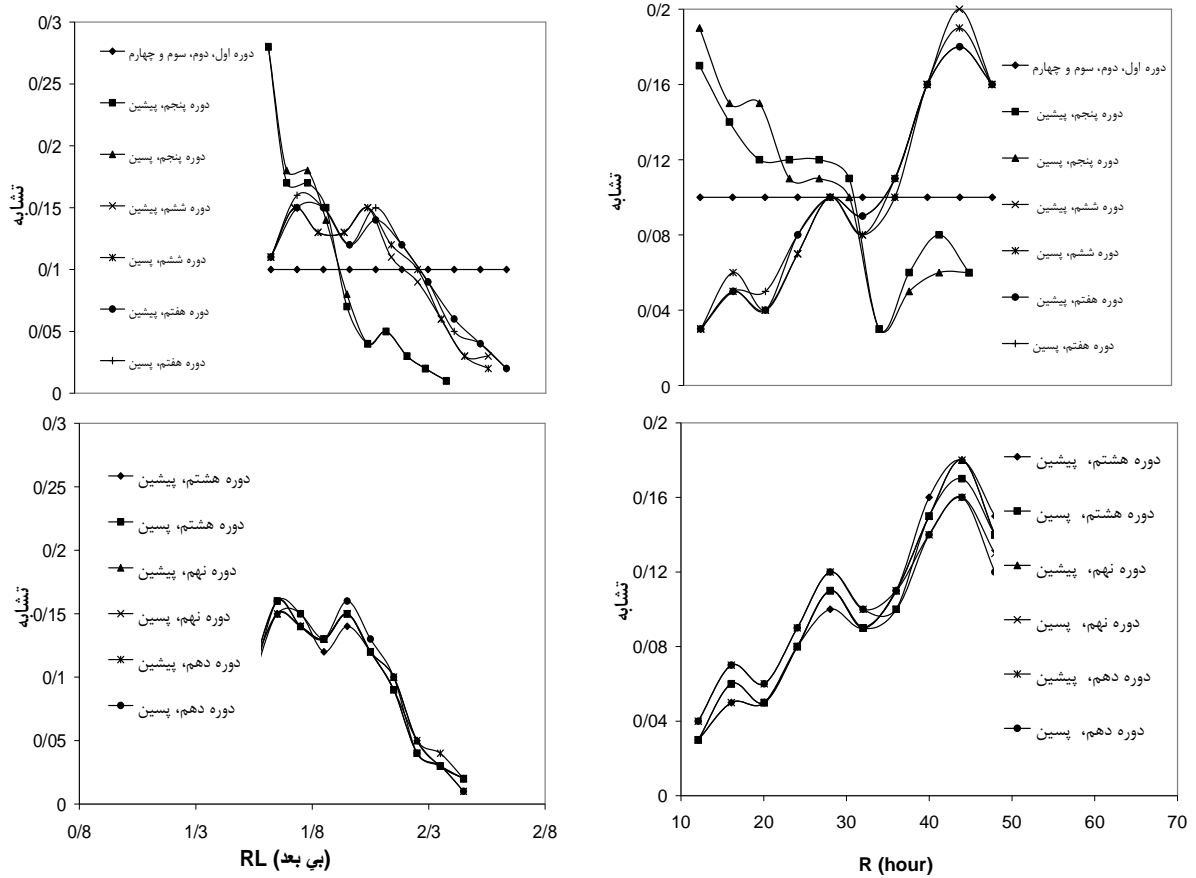
شکل 4 توزیع PDF دبی اوج هیدروگراف سیل مورخ 57/9/18 (75/5 cms) در 10 دوره پیوسته با آستانه رد شدن 0/3

جدول 1 مقادیر مورد انتظار دبی اوج پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب مورخ آذر 57 همراه با محدوده‌های اطمینان (دبی اوج مشاهده‌ای 75/5cms)

دوره‌های بهنگام‌سازی	تشابه بهنگام‌سازی	دبی مورد انتظار (cms)	حد 10% اطمینان (cms)	حد 40% اطمینان (cms)	حد 60% اطمینان (cms)	حد 90% اطمینان (cms)	درصد خطا نسبت به مقدار مورد انتظار
اول، دوم، سوم و چهارم	پیشین	87/5	21	64/4	86/8	133	13/2
پنجم	پیشین	49/7	17/3	34/4	53/2	77	34/2
	پسین	50/7	17/2	34/8	54/9	78/9	32/8
ششم	پیشین	57/1	39/3	51/2	59/3	72	24/4
	پسین	58/5	37	50/5	59/6	74/6	22/5
هفتم	پیشین	61/3	31	53/4	65/1	82/1	18/1
	پسین	61/9	34/7	52/7	62/4	79/8	18
هشتم	پیشین	61/3	32/3	53/2	64/2	80/3	18/8
	پسین	61/8	35/1	52/5	62	78/6	18/1
نهم	پیشین	61/7	37/4	53/3	62/2	79/1	18/3
	پسین	62/2	34/8	53/5	63/8	80/7	17/6
دهم	پیشین	62/5	36/7	54/3	64/3	80/7	17/2
	پسین	63/1	39	54/2	62/9	79/4	16/4



شکل 5 توزیع پارامتر نفوذ اولیه با تشابه پیشین و پسین با 10 دوره پیوسته و آستانه رد شدن 0/3



شکل 6 توزیع پارامتر ضریب ذخیره و ضریب نفوذ باران (روش نفوذ نمایی)

با تشابه پیشین و پسین با 10 دوره زمانی پیوسته و آستانه رد شدن 0/3

خطاها و همچنین ترکیب خطای دبی‌های مختلف هیدروگراف در روش پیوسته، از 10 تا 6 دوره کاهش داده شد که نتیجه حاصل، تغییر چندانی نداشت. تنها اختلاف مربوط به فواصل زمانی بهنگام‌سازی و محدود کردن تعداد بهنگام‌سازی بر اساس زمان اجرای مدل بود. لازم است ذکر شود که علاوه بر دبی اوج هیدروگراف، توزیع احتمالاتی سایر دبی‌های هیدروگراف نیز با دبی مشاهده‌ای اصلاح می‌شوند که امکان نمایش آنها به علت تعداد زیاد گرافها وجود ندارد.

نتایج این بررسی نشان می‌دهد که روش پیوسته در مقایسه با کلیه دوره‌های بهنگام‌سازی، برتری کاملاً محسوسی در اصلاح محدوده پیش‌بینی‌ها نسبت به روش مجزا دارد. بنابراین روش پیوسته به عنوان روش بهنگام‌سازی پیش‌بینی‌ها پیشنهاد می‌شود. این روش قابل تعمیم به هر گام زمانی نیز هست.

بنابراین در این دوره‌ها، توزیع احتمالاتی پارامترها به تفکیک پیشین و پسین وجود ندارد. از دوره زمانی پنجم تا دهم توزیع هر یک از پارامترها به تفکیک تشابه پیشین و پسین تعیین شد.

توزیع احتمالاتی هر پارامتر در طی دوره‌های بهنگام‌سازی دستخوش تغییر می‌شود و در نهایت به توزیع پایداری می‌رسد. مقادیر مورد انتظار هر یک از پارامترهای بارش-رواناب در جدول 2 در دوره‌های بهنگام‌سازی محاسبه شده است. در این جدول برای پارامترهای غیرحساس، به علت عدم تغییر قابل توجه‌ای در توزیع احتمالاتی آن، مقادیر نسبتاً ثابتی در هر دوره بهنگام‌سازی حاصل شده است.

7- تحلیل حساسیت و انتخاب روش

تعداد دوره‌های بهنگام‌سازی به‌منظور تعیین حساسیت نتایج نسبت به تعداد نقاط دبی در محاسبه واریانس

جدول 2 مقادیر مورد انتظار پارامترهای بارش-رواناب در دوره‌های بهنگام‌سازی بر اساس توزیع احتمالاتی

پارامتر مدل بارش - رواناب								تشابه بهنگام‌سازی	دوره بهنگام‌سازی
RK (mm)	SS (mm/h)	ER	RL	DL (mm)	SR (mm/h)	R (hour)	Tc (hour)		
2	6/1	0/65	1/55	24	9	30	20	پیشین	اول، دوم، سوم و چهارم
2/1	6	0/8	1/7	17/3	10/7	25/1	19/2	پیشین	پنجم
2	6	0/8	1/7	17/5	11	24/1	19/6	پسین	
2	6/3	0/7	1/9	24/8	10/7	35/8	20/8	پیشین	ششم
2	6.5	0/7	1/9	24/8	10/8	35/2	20/9	پسین	
2/1	6/3	0/7	1/9	25/2	10/5	35/5	20/3	پیشین	هفتم
2	6/3	0/7	1/9	25/9	10/4	35/7	20/9	پسین	
2	6/3	0/7	1/8	25/3	10/3	35/2	20	پیشین	هشتم
2	6/3	0/7	1/9	24/9	10.5	34	20/6	پسین	
2/1	6/4	0/7	1/9	25/1	10.5	34/8	20/2	پیشین	نهم
2/1	6/3	0/7	1/8	25	10.5	34	20/5	پسین	
2	6/2	0/7	1/9	25/1	10/7	34/6	19/6	پیشین	دهم
2	6/3	0/7	1/9	24/6	10/5	33/9	20/6	پسین	

8- بهنگام‌سازی زمان واقعی با فرض قطع

بارش

با افزایش تعداد دوره‌های زمانی، مراحل بهنگام‌سازی بر اساس دبی‌های ثبت شده قبل از وقوع سیل افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مقایسه نتایج به ازای تعداد دوره‌های مختلف نشان از برتری بهنگام‌سازی در دوره‌های زیاد دارد، زیرا در مراحل زیاد، بهنگام‌سازی قبل از وقوع اوج سیل در چندین مرحله انجام می‌شود، در حالی که در تعداد دوره‌های کم، تعداد مراحل بهنگام‌سازی به مراتب کمتر است. بنابراین توصیه می‌شود در صورتی که زمان اجرای کامپیوتر کمتر از گام زمانی داده‌های ارسالی از شبکه تله‌متری باشد، بهنگام‌سازی در هر گام زمانی ثبت داده‌ها با بکارگیری روش پیوسته انجام شود. با افزایش تعداد دوره‌های بهنگام‌سازی، امکان اصلاح محدوده پیش‌بینی‌ها با دبی‌های مشاهده‌ای جدید در زمان واقعی میسر می‌شود. این افزایش تا حدی می‌تواند پیش رود که با هر دبی ارسالی از ایستگاه اندازه‌گیری، یک بار بهنگام‌سازی انجام شود.

تنها محدودیت بهنگام‌سازی در هر گام زمانی محاسبات (یا داده‌های ارسالی)، محدودیت زمان اجرای مدل بارش-رواناب در شبیه‌سازی مونت کارلو است که با افزایش توان کامپیوتر برای تعداد زیاد گروه پارامترها، برطرف می‌شود. البته در این روش می‌توان تعداد گروه پارامترهای تولید شده را به حدی کاهش داد تا مدت اجرای مدل در زمان مورد نظر پایان یابد. اما کاهش تعداد گروه پارامترها، سبب عدم پوشش کامل فضای پارامتری و ایجاد خطا در پیش‌بینی‌ها می‌شود. بنابراین دوره‌های زمانی بهنگام‌سازی می‌تواند بر اساس زمان اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین شود که در اینجا توان کامپیوتر برای افزایش تعداد دوره‌های بهنگام‌سازی، تعیین کننده خواهد بود. در این تحقیق به علت محدودیت توان کامپیوتر، در بهنگام‌سازی زمان واقعی تعداد گروه پارامترها به 1400 محدود شد.

به منظور بررسی نتایج بهنگام‌سازی زمان واقعی در هر گام زمانی ثبت داده‌های هیدروگراف (یک ساعت)، در هر گام زمانی بهنگام‌سازی محدوده پیش‌بینی‌ها با استفاده از تشابه پیشین و پسین دوره پیوسته از شروع سیل تا گام زمانی مورد نظر انجام شد. خطاهای مشاهده‌ای از زمان شروع سیل تا هر گام زمانی (به عنوان زمان واقعی) برای اصلاح محدوده پیش‌بینی‌ها به کار رفت و بهنگام‌سازی تا انتهای هیدروگراف سیل ادامه پیدا کرد. در هر گام زمانی با استفاده از روش GLUE محدوده پیش‌بینی هیدروگراف سیل بر اساس دبی ثبت شده تعیین می‌شود. در این رابطه فرض شد که بارش در زمان واقعی قطع می‌شود، بدین معنی که پیش‌بینی بارش در شبیه‌سازی بارش-رواناب انجام نشد.

مهمترین کاربرد بهنگام‌سازی زمان واقعی، اصلاح دبی اوج هیدروگراف سیل است. برای سیلاب 18 آذر 1357 نتایج محدوده پیش‌بینی دبی اوج بدون بهنگام‌سازی و با بهنگام‌سازی بر اساس تشابه پسین و در نظر گرفتن معیار رد شدن $0/3$ در هر گام زمانی، در شکل 7 نشان داده شده است. در گزینه بدون بهنگام‌سازی، تمام مدل‌های تصادفی تولید شده به عنوان مدل‌هایی قابل قبول¹ پذیرفته شده و محدوده‌های حداکثر، حداقل و 90% اطمینان بر اساس نتایج شبیه‌سازی این مدل‌ها در هر گام زمانی تعیین شد. در حالی که در گزینه بهنگام‌سازی، خطاهای مشاهده‌ای در زمانهای گذشته برای تعیین مدل‌های قابل قبول و تشابهات پیشین و پسین بکار رفت و محدوده پیش‌بینی در هر گام زمانی - به تفکیک بر اساس وزنه‌های حاصل از تشابه پیشین و پسین - تعیین شد که در شکل مربوط محدود پیش‌بینی تشابه پسین نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود محدوده وسیعی برای دبی اوج حول مقدار مشاهده‌ای حاصل می‌شود که با بهنگام‌سازی بر اساس خطاها، این محدوده باریکتر می‌شود.

1. Behavioral

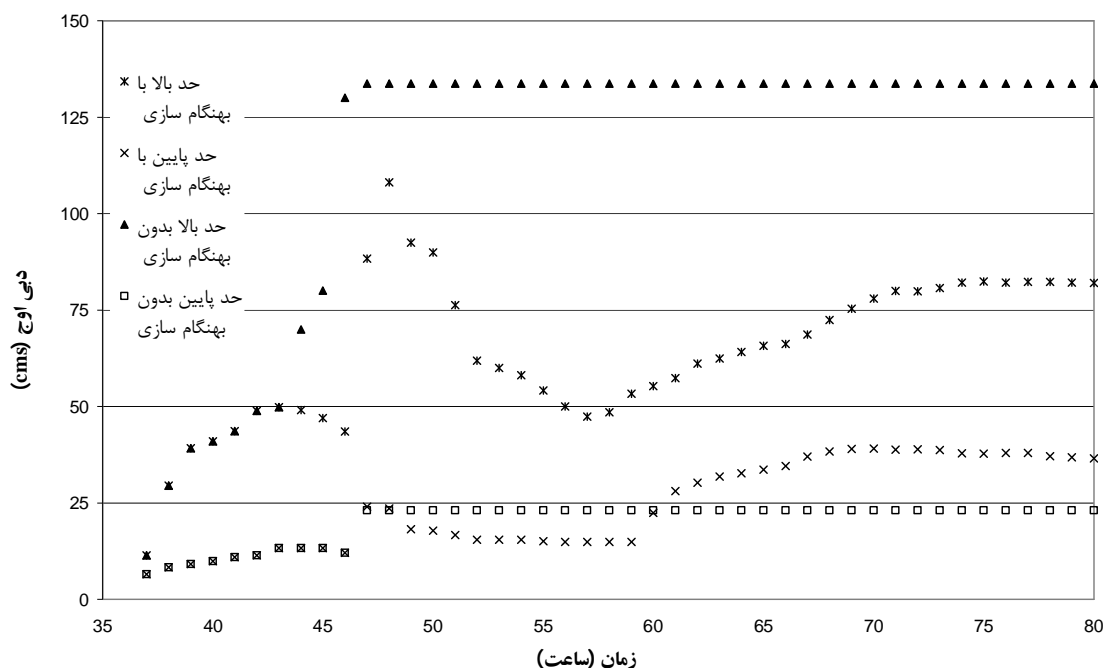
قابل قبول تفکیک شده و محدوده پیش‌بینی‌ها بر اساس این مدلها اصلاح می‌شود. مدل‌های قابل قبول در هر گام زمانی با استفاده از تشابه مشروط حاصل از خطاهای شبیه‌سازی در گام‌های زمانی گذشته، قابل محاسبه است. برای این منظور تئوری بیز بکار رفت که در آن تشابهات پیشین بر اساس تشابه مشروط به تشابه پسین تبدیل می‌شود. در بهنگام‌سازی زمان واقعی، تشابه پسین هر گام زمانی به عنوان تشابه پیشین گام زمانی بعدی در نظر گرفته شد که این موضوع در پایدار شدن سریعتر توزیع‌های پیشین و پسین دبی اوج مؤثر بود.

9- توزیع احتمالاتی دبی اوج

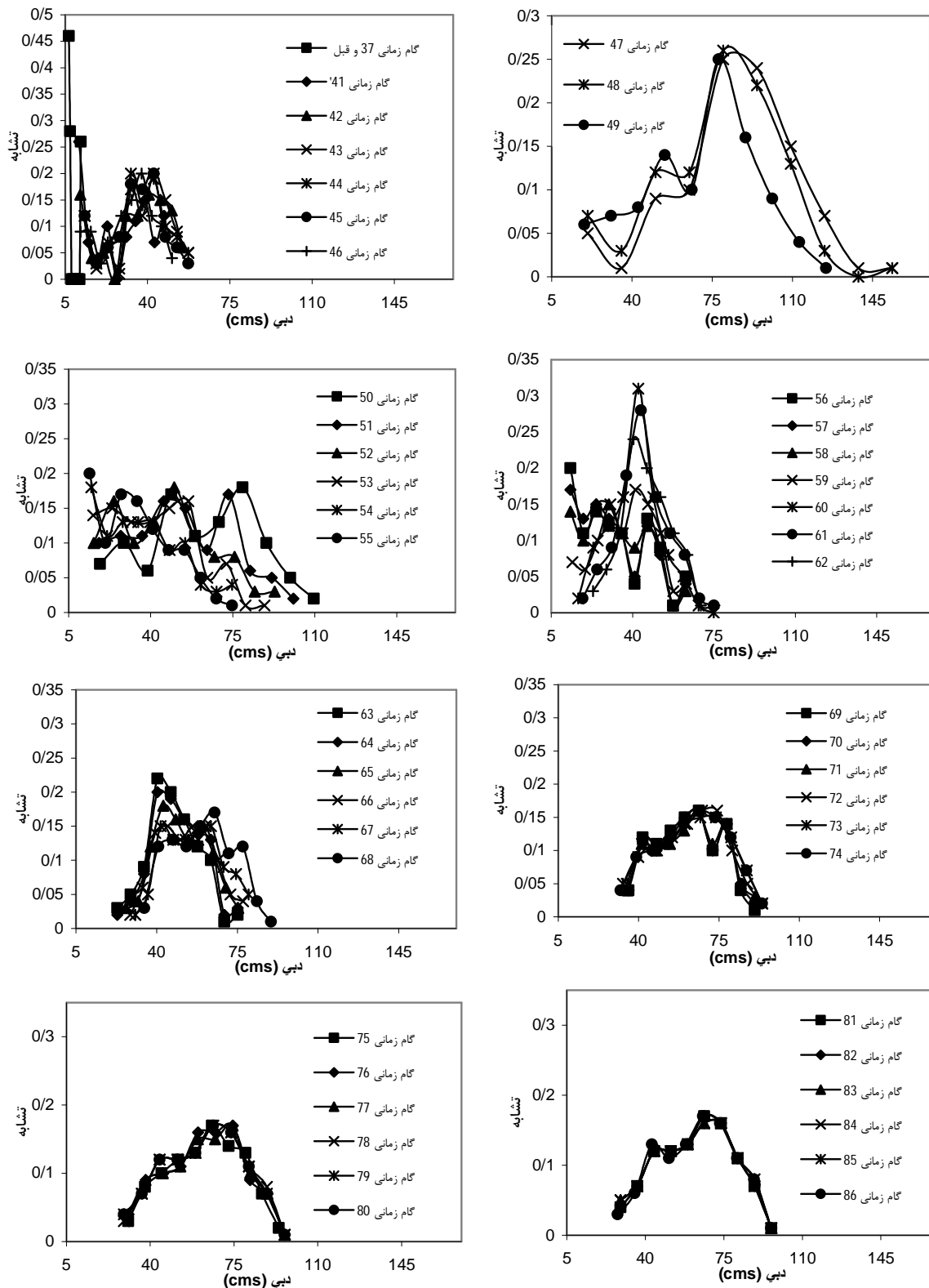
توزیع احتمالاتی دبی اوج با استفاده از تشابه پیشین و پسین در هر گام زمانی محاسبه شد که نتایج آن برای تشابه پسین در شکل 8 ارائه شده است.

در گام‌های زمانی اولیه، هیدروگراف سیل بر اساس بخشی از هیتوگراف بارش واقعی شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین دبی شبیه‌سازی با دبی مشاهده‌ای اختلاف قابل توجهی دارد. در این گام‌های زمانی، دبی‌های پیش‌بینی هیدروگراف بسیار کمتر از مقادیر واقعی (مشاهده‌ای) است که این موضوع در دبی اوج سیل کاملاً ملموس است. در این بخش به دلیل عدم انطباق هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای، مدل‌های قابل قبول وجود ندارد و بهنگام‌سازی محدوده پیش‌بینی امکان‌پذیر نیست. بنابراین در این گام‌های زمانی، تمامی مدل‌هایی تصادفی به عنوان مدل‌های قابل قبول در نظر گرفته شده و محدوده پیش‌بینی‌ها براساس دبی شبیه‌سازی مدل‌های قابل قبول تعیین شد.

با پیشرفت زمان، هیتوگراف بارش بر بارش واقعی منطبق و دبی‌های شبیه‌سازی به مقادیر واقعی نزدیکتر می‌شود. بنابراین از بین تمامی مدل‌های تصادفی، مدل‌های



شکل 7 محدوده 10% و 90% اطمینان پیش‌بینی دبی اوج برای سیلاب آذر 57 در هر گام زمانی (دبی اوج مشاهده‌ای $75/5 \text{ m}^3/\text{s}$ ، زمان رسیدن به اوج 68 ساعت)



شکل 8 توزیع احتمالاتی دبی اوج هیدروگراف سیلاب مورخ آذر 57 با بهنگام‌سازی بر اساس تشابه پسین در هر گام زمانی در زمان واقعی وقوع سیل (دبی اوج مشاهده‌ای $75/5 \text{ m}^3/\text{s}$)

هر گام زمانی بهنگام‌سازی، در جدول 3 و شکل 9 آورده شده است.

در شروع سیل، دبی هیدروگراف محاسبه‌ای بر دبی پایه مشاهده‌ای منطبق است؛ بنابراین خطای محاسباتی برای اصلاح وجود ندارد. با افزایش گامهای زمانی و اوج‌گیری هیدروگراف سیل، خطاها ملموس‌تر و نقش اصلاحی این خطاها در توزیع احتمالاتی دبی اوج آشکار می‌شود. در این سیل محدوده پیش‌بینی دبی اوج بدون بهنگام‌سازی در محدوده $20-135 \text{ (m}^3/\text{s)}$ در گام های زمانی پس از 47 (منطبق بر زمان انتهای هیتوگراف بارش) است در حالی که این محدوده، به $35-90 \text{ (m}^3/\text{s)}$ از گام زمانی 69 به بعد اصلاح می‌شود.

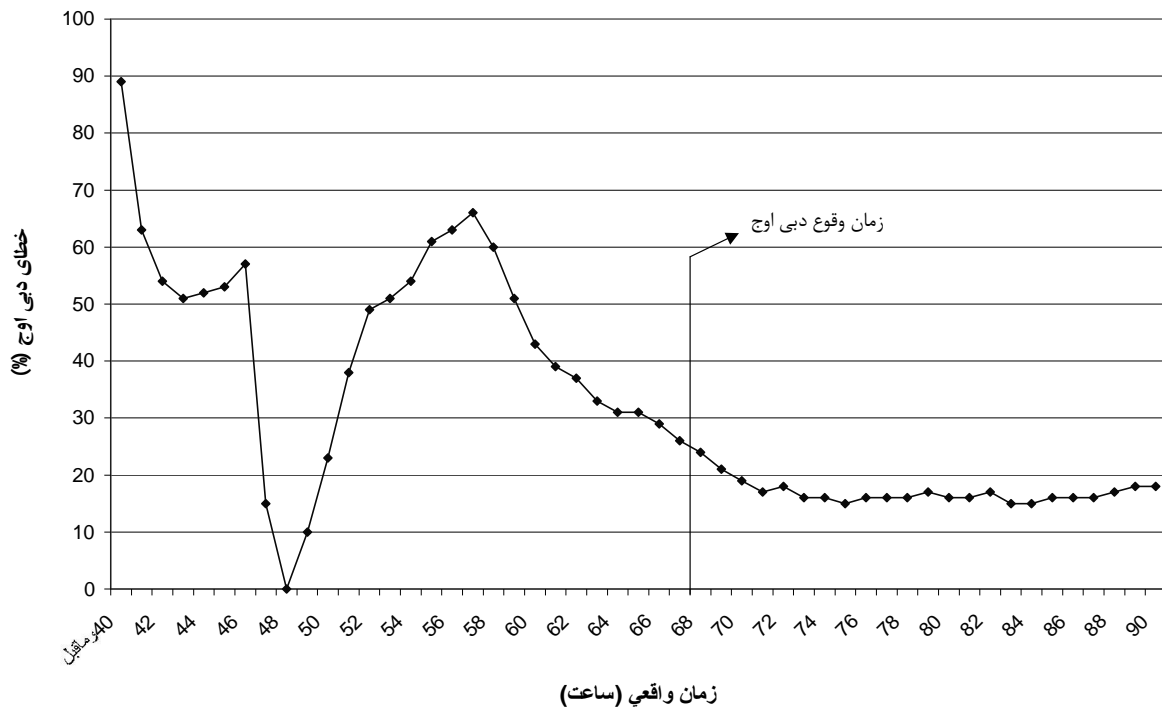
همان طور که مشاهده می‌شود توزیع احتمالاتی دبی اوج با پیشرفت رگبار اصلاح می‌شود و تابع توزیع احتمالاتی (PDF) دبی‌ها در گامهای زمانی که رگبار شکل واقعی می‌گیرد، به صورت پایدار در می‌آید. پایدار شدن توزیع دبی اوج قبل از وقوع آن، نشان از کارایی روش GLUE در بهنگام‌سازی زمان واقعی و امکان‌پذیری استفاده از آن در سیستمهای پیش‌بینی سیل دارد.

10- خطای پیش‌بینی دبی اوج و زمان پیش‌هشدار

مقدار مورد انتظار پیش‌بینی دبی اوج هیدروگراف سیل آذر 57 همراه با خطای آن نسبت به مقدار مشاهده‌ای در

جدول 3 مقادیر مورد انتظار دبی اوج پیش‌بینی شده بر اساس توزیع احتمالاتی آن و خطای مربوط در هر گام زمانی واقعی وقوع سیل آذر 57 (دبی مشاهده‌ای $75/5 \text{ m}^3/\text{s}$)

گام زمانی (ساعت)	دبی پیش‌بینی (cms)	درصد خطا	گام زمانی (ساعت)	دبی پیش‌بینی (cms)	درصد خطا	گام زمانی (ساعت)	دبی پیش‌بینی (cms)	درصد خطا
40 و ماقبل	8	89	58	30/1	60	76	63/5	16
41	27/7	63	59	36/9	51	77	63/5	16
42	34/7	54	60	43/3	43	78	63/2	16
43	37	51	61	45/9	39	79	63	17
44	36/1	52	62	47/5	37	80	63/3	16
45	35/3	53	63	50/3	33	81	63/1	16
46	32/4	57	64	51/9	31	82	62/5	17
47	64/5	15	65	51/9	31	83	64	15
48	57/7	0	66	53/4	29	84	64	15
49	67/6	10	67	55/9	26	85	63/4	16
50	58/2	23	68	57/1	24	86	63/4	16
51	46/6	38	69	59/6	21	87	63/4	16
52	38/6	49	70	60/8	19	88	62/9	17
53	36/7	51	71	62/5	17	89	62/1	18
54	34/6	54	72	62	18	90	62/1	18
55	29/3	61	73	63/2	16			
56	28/1	63	74	63/2	16			
57	25/8	66	75	64/1	15			



شکل 9 خطای مقادیر مورد انتظار پیش‌بینی دبی اوج در هر گام زمانی واقعی وقوع سیل آذر 57

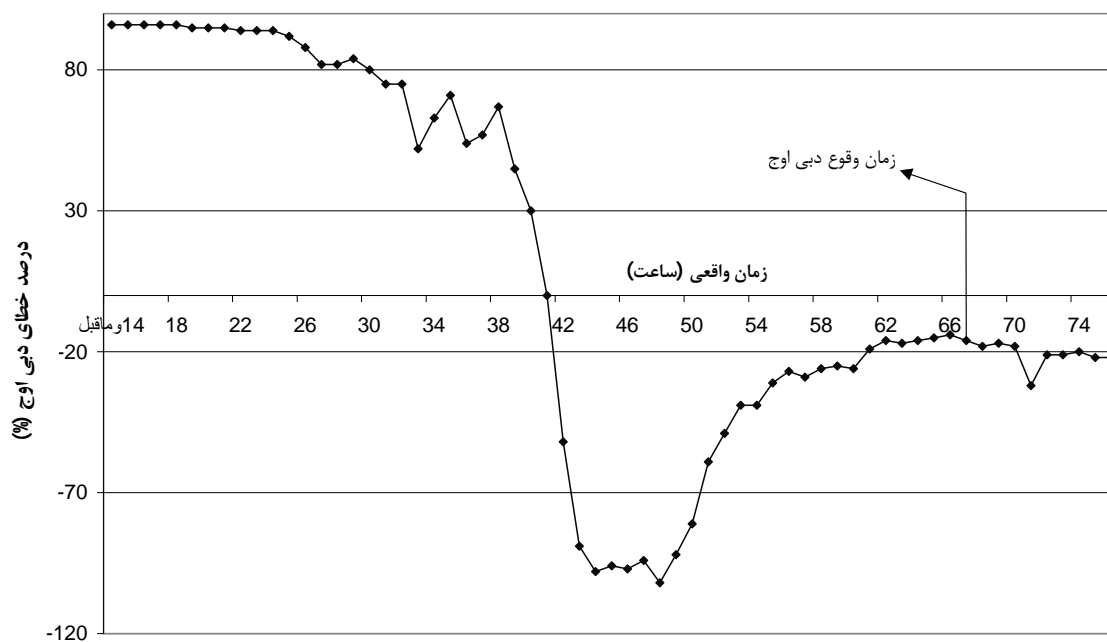
مقدار مورد انتظار دبی اوج پیش‌بینی در این سیل نسبت به مقدار واقعی مشاهده‌ای، دست‌پایین است، اما محدوده اطمینان 90% و 10% آن را پوشش می‌دهد. کاهش نیافتن محدوده پیش‌بینی‌ها از حد نهایی، ناشی از عدم قطعیت ساختار مدل و داده‌های ورودی است، زیرا در صورتی که خطای محاسبه‌ای وجود نداشته باشد، محدوده پیش‌بینی باید کاملاً بر دبی مشاهده‌ای منطبق شود که در عمل چنین حالتی اتفاق نمی‌افتد.

بهنگام‌سازی زمان واقعی برای سیلاب آبان 68 نیز انجام شد که در آن، دبی اوج در گام زمانی 67 پس از شروع سیل اتفاق می‌افتد و توزیع دبی اوج در گام زمانی 58 پایدار می‌شود. میزان خطای پیش‌بینی دبی اوج برای مقادیر مورد انتظار دبی پیش‌بینی در هر گام زمانی واقعی وقوع سیل بر اساس توزیع احتمالاتی آن در شکل 10 نشان داده شده است.

فاصله زمانی بین پایدار شدن توزیع احتمالاتی دبی اوج و زمان واقعی وقوع آن یا به بیان دیگر زمان پیش‌هشدار در این سیل حدود 9 ساعت است.

در گام زمانی 48 بهنگام‌سازی، مقدار مورد انتظار دبی اوج منطبق بر دبی مشاهده‌ای شده است که در آن صفر شدن خطا کاملاً اتفاقی بوده و دلیلی منطقی برای آن قابل ارائه نیست. در گامهای زمانی پس از 72، توزیع دبی اوج پایدار و به مقدار مشاهده‌ای $75/5 \text{ m}^3/\text{s}$ نزدیکتر می‌شود. در سیلاب آذر 57، توزیع دبی اوج در گامهای زمانی پس از 60 پایدار می‌شود و حدود حداکثر و حداقل مقدار دبی اوج مشاهده‌ای را پوشش می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که توزیع دقیقتر دبی اوج تقریباً در گام زمانی 60 حاصل می‌شود که از این زمان تا زمان وقوع دبی اوج، 8 ساعت فاصله زمانی وجود دارد. بنابراین در این سیل زمان پیش‌هشدار برای پیش‌بینی سیل حدود 8 ساعت حاصل می‌شود.

اثر بهنگام‌سازی توزیع دبی اوج از گام زمانی 60 به بعد قابل صرف‌نظر کردن است. در این آزمون قبل از وقوع دبی اوج، بهنگام‌سازی توزیع دبی اوج بسیار مؤثر است، در حالی که پس از وقوع دبی اوج، دبی مشاهده‌ای در زمان واقعی اصلاح قابل توجهی در توزیع دبی اوج ندارد.



شکل 10 خطای مقادیر مورد انتظار دبی پیش‌بینی در هر گام زمانی واقعی وقوع سیل آبان 68

زمان پیش‌هشدار در نظر گرفته شد. در دو آزمون انجام شده در بهنگام‌سازی زمان واقعی، محدوده پیش‌بینی‌ها کاملاً بر مقدار مشاهده‌ای منطبق نمی‌شود و مقادیر مورد انتظار پیش‌بینی‌ها نسبت به مقدار مشاهده‌ای دست بالا و پایین حاصل می‌شوند که این موضوع نشان از عدم قطعیت ساختار مدل و داده‌های ورودی دارد.

در بهنگام‌سازی با استفاده از روش GLUE، توزیع پایدار پارامترهای مدل بارش-رواناب، همزمان با پایدار شدن توزیع دبی‌ها بوقوع می‌پیوندد. همچنین تأثیر دبی ثبت شده در زمان واقعی در اصلاح پارامترها در مراحل بهنگام‌سازی کاملاً مشهود است. از آنجا که به تعداد زیادی مدل‌های تصادفی در روشهای مبتنی بر مونت کارلو نیاز است، مدت زمان اجرای کامپیوتر برای تعداد مناسب مدل‌ها افزایش می‌یابد و حتی ممکن است بیشتر از گام زمانی شبیه‌سازی گردد. در این حالت کاهش تعداد مدل‌ها با توجه به توان کامپیوتر ناگزیر انجام می‌شود که می‌تواند در دقت نتایج اثر منفی بگذارد. برای حل مشکل می‌توان بهنگام‌سازی را یک بار در هر چند گام زمانی انجام داد. در این مقاله، به‌علت محدودیت توان کامپیوتر،

محدوده دبی اوج سیل بدون بهنگام‌سازی بین 10 و 120 متر مکعب در ثانیه در گام‌های زمانی پس از 40 است، در حالی که با بهنگام‌سازی این دامنه به $20-70 \text{ m}^3/\text{s}$ پس از گام زمانی 58 محدود می‌شود (دبی اوج مشاهده‌ای $43/7 \text{ m}^3/\text{s}$). در گام زمانی 41 بهنگام‌سازی، منحنی خطای پیش‌بینی محور افقی را قطع می‌کند که مشابه سیلاب، محدوده اطمینان پیش‌بینی در آن بسیار وسیع است. از این گام زمانی به بعد محدوده پیش‌بینی کاهش می‌یابد و مقدار مورد انتظار پیش‌بینی‌ها نسبت به مقدار مشاهده‌ای، دست‌بالا است.

11- نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌منظور بهنگام‌سازی زمان واقعی، دو آزمون روش مجزا و پیوسته انجام شد که نتایج حاصل حاکی از برتری روش پیوسته بود. روش GLUE برای بهنگام‌سازی زمان واقعی در هر گام زمانی مورد استفاده قرار گرفت، که در آن توزیع احتمالاتی دبی اوج قبل از زمان وقوع دبی اوج هیدروگراف، پایدار گردید. زمان پایدار شدن توزیع دبی اوج تا زمان وقوع آن، به عنوان

13- منابع

- [1] ثقفیان ب، حیدری ع. و مکنون ر، بهنگام‌سازی زمان واقعی در مدل پیش‌بینی سیل با بکارگیری روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE)، بخش اول: متدولوژی، نشریه علمی - پژوهشی هیدرولیک، بهار 1386.
- [2] حیدری ع، ثقفیان ب. و مکنون ر، شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های بارش-رواناب، نشریه علمی-پژوهشی استقلال، شماره 2، زمستان 1383.
- [3] حیدری ع، ثقفیان ب. و مکنون ر، تلفیق تئوری بیز با روش مونت کارلو برای ارتقاء نتایج واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی، مجله تحقیقات منابع آب، پاییز 1384.
- [4] Beven K. J., (2000), Rainfall – Runoff modeling, John Wiley & Sons, LTD, PP. 314.
- [5] Beven K. J., (2002), Environmental foresight and models: Chapter 12– Uncertainty and the detection of structural change in models of environmental system, Elsevier science B. V, ACADEMIC PRESS, PP. 390.
- [6] Freer J. and Beven K. J. (1996), Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach, Water Resource Research, 32(7): 2161-2173.

بهنگام‌سازی در هر گام زمانی با 1400 مدل تصادفی انجام شد. همچنین پیش‌بینی بارش در زمان واقعی در نظر گرفته نشد و فرض گردید بارش در زمان واقعی وقوع رگبار، قطع می‌شود. پیش‌بینی بارشهای محتمل و اعمال عدم قطعیت ناشی از آن، در تکمیل عدم قطعیت‌های موجود در سیستم‌های پیش‌بینی سیل، می‌تواند گام مثبتی در برای اصلاح پیش‌بینی‌ها باشد.

12- فهرست علائم

DL,RL, ER	پارامترهای نفوذ بارش باران بر حسب میلیمتر
$L(\theta_i Y)$	معیار تشابه i امین مدل مشروط بر مشاهدات (Y) از شروع هیدروگراف تا زمان t
R	ضریب ذخیره حوزه بر حسب ساعت
SS ,RK	پارامترهای نفوذ ذوب برف بر حسب (mm/hr)
SR	پارامتر نفوذ نمایی بر حسب (mm/hr)
t	ام زمانی شبیه‌سازی
t_c	زمان تمرکز حوزه بر حسب ساعت